

**Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft**

**Technische Universität Darmstadt**



# **MITTEILUNGEN**

**Heft 157**

**2020**

**Imke Böckmann**

**Entwicklung eines Verfahrenskataloges für statistisch abgesicherte  
ethohydraulische Forschungen**

D 17

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2020

D17

Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
der Technischen Universität Darmstadt; Heft 157

**Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft**  
**Technische Universität Darmstadt**



**Entwicklung eines Verzeichnisses für  
statistisch abgesicherte ethohydraulische Forschungen**

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktorin der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigte Dissertation von

**Imke Böckmann**

aus Bielefeld

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lehmann
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Schüttrumpf
3. Gutachterin: Prof. Dr. rer. nat. L. Schebek

Tag der Einreichung: 8.10.2019  
Tag der mündlichen Prüfung: 20. Dezember 2019

Darmstadt, im März 2020

Böckmann, Imke: Entwicklung eines Verfahrenskataloges für statistisch abgesicherte  
ethohydraulische Forschungen  
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,  
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2020  
Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2019

Veröffentlicht unter CC BY-NC-SA 4.0 International  
<https://creativecommons.org/licenses/>



Diese Mitteilungsreihe hat zwei Wurzeln:

- die **“Wasserbau-Mitteilungen”** (41 Hefte), begründet 1966 von Prof. Dr.-Ing. Friedrich Bassler, später fortgeführt von Prof. Dr.-Ing. Josef Mock,
- die **“Technischen Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik”** (54 Hefte), herausgegeben seit 1965 von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Otto Kirschmer, später fortgeführt von Prof. Dr.-Ing. Ralph C. M. Schröder und Prof. Dr.-Ing. Manfred Ostrowski.

Mit dem Dienstantritt von Prof. Dr.-Ing. Ulrich Zanke als Nachfolger von Prof. Mock sind diese beiden Reihen zusammengeführt worden. Die zwei Fachgebiete des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft

- Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung
- Wasserbau und Hydraulik

dokumentieren damit auch nach außen ihre Zusammengehörigkeit. Die neue Nummerierung ergibt sich aus der Summe der Hefte beider Vorgängerreihen.

Die **“Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt”** erscheinen in unregelmäßiger Folge im Eigenverlag des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Ein Nachdruck, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung des Geschäftsführenden Institutsdirektors gestattet.

(ISSN 1430-3434)

FG Ingenieurhydrologie  
u. Wasserbewirtschaftung  
Franziska-Braun-Straße 7  
64287 Darmstadt  
Tel.: 0 61 51/16 20860

FG Wasserbau und Hydraulik  
Franziska-Braun-Straße 7  
64287 Darmstadt  
Tel.: 0 61 51/16 21165

E-Mail: feldmann@ihwb.tu-darmstadt.de

E-Mail: wabau@wb.tu-darmstadt.de

Aktuelle Informationen über das Institut und seine Lehrangebote finden Sie im World Wide Web unter: <http://www.iww.tu-darmstadt.de>

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann (Wasserbau und Hydraulik)  
Prof. Dr. habil. Britta Schmalz (Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung)

## Abstract

For the development and design of facilities for the production of continuity in water bodies, it is important to consider the behavior of fish in terms of hydraulic structures. The investigation before the construction of fish-relevant protection and continuity structures outside the already published state of the art is specifically regulated in North Rhine-Westphalia to the effect that investigations of a high functionality of the system must be proven in advance. The method of choice here are, in addition to the pure engineering methods (such as numerical or physical flow modeling) ethohydraulic studies, which investigate the behavior of aquatic organisms in relation to hydraulic structures.

So far, the approach to data acquisition and the later statistical evaluation of ethohydraulic countable events has not followed a generally accepted, standardized approach, which is currently demanded from various quarters as a future-oriented methodology.

Within the framework of the present work different fundamentals and findings from own projects and literature are put together in a so-called process catalog, which are to serve the quality assurance during the planning and execution of ethohydraulic tests (object of research I). In addition to a standardized assessment of stimulus-induced fish reactions, the application of the catalog contents allows an evaluation of ethohydraulically countable events by means of closing statistics, which ensures high resilience of the results.

In addition, a general sampling plan will be developed, which will allow to determine the number of actually experimental animals needed before starting the ethohydraulic tests (object of research II). The number of animals identified in the sampling plan ensures that the number of tested animals is sufficient to prove existing significant effects with high certainty. Conversely, a sample size that is too small can be excluded as the cause, so that a time- and cost-intensive trial repetition with larger samples is unnecessary. Thus, in view of ethical and economic considerations, it is taken into account that as few animals as possible but as many as necessary for statistically meaningful results are used for the examinations.

The product of this work is a process catalog for ethohydraulic investigations, which bundles the developed principles and findings and makes them available as a digital version. The addressed user group includes performers of ethohydraulic tests. The digital application contains guidelines and useful information, which should be considered as the basis for a standardized procedure during the ethohydraulic tests and the subsequent data analysis as well as a general computational module for sample planning.

## Kurzfassung

Im Rahmen der Entwicklung und Bemessung von Anlagen zur Herstellung der Durchgängigkeit von Fließgewässern ist die Berücksichtigung des Verhaltens von Fischen in Bezug auf die wasserbaulichen Strukturen unerlässlich. Die Untersuchung im Vorfeld des Baus von fischrelevanten Schutz- und Durchgängigkeitsstrukturen außerhalb des bereits publizierten Standes der Technik ist speziell in Nordrhein-Westfalen dahingehend geregelt, dass mittels geeigneter Untersuchungen vorab eine hohe Funktionalität des Systems nachgewiesen werden muss. Das Mittel der Wahl sind hier neben den rein ingenieurtechnischen Methoden (wie beispielsweise numerische oder physikalische Strömungsmodellierungen) ethohydraulische Untersuchungen, welche die Verhaltensweisen aquatischer Organismen in Bezug auf bauliche oder hydraulische Strukturen erforschen.

Bislang folgt der Ansatz hinsichtlich der Datenaufnahme und der späteren statistischen Auswertung von ethohydraulisch zählbaren Ereignissen keiner allgemeingültigen, standardisierten Vorgehensweise, was jedoch aktuell von verschiedenen Seiten als zukunftsorientierte Methodik gefordert wird.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Grundlagen und Erkenntnisse aus eigenen Projekten und der Literatur in einem sog. Verfahrenskatalog zusammengestellt, welche der Qualitätssicherung während der Planung und Durchführung ethohydraulischer Tests dienen sollen (Forschungsgegenstand I). Neben einer standardisierten Bewertung reizinduzierter Fischreaktionen ermöglicht die Anwendung der Kataloginhalte eine Auswertung ethohydraulisch zählbarer Ereignisse mittels schließender Statistik, was eine hohe Belastbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.

Darüber hinaus wird eine allgemeingültige Stichprobenplanung entwickelt, die es ermöglicht, die Anzahl an tatsächlich benötigten Versuchstieren bereits vor Beginn der ethohydraulischen Tests verlässlich zu bestimmen (Forschungsgegenstand II). Die im Rahmen der Stichprobenplanung ermittelte Anzahl an Versuchstieren gewährleistet, dass die Anzahl getesteter Tiere ausreichend ist, um vorhandene signifikante Effekte mit hoher Sicherheit nachzuweisen. Im Umkehrschluss kann bei fehlenden Signifikanzen eine zu geringe Stichprobengröße als Ursache ausgeschlossen werden, so dass eine zeit- und kostenaufwendige Versuchswiederholung mit größeren Stichproben unnötig ist. So wird vor dem Hintergrund ethischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte berücksichtigt, dass so wenig Tiere wie möglich, aber so viele, wie für statistisch aussagekräftige Ergebnisse nötig, für die Untersuchungen verwendet werden.

Das Produkt der vorliegenden Arbeit ist ein Verfahrenskatalog für ethohydraulische Untersuchungen, der die erarbeiteten Grundlagen und Erkenntnisse bündelt und als digitale Version zur Nutzung bereitstellt. Die angesprochene Nutzergruppe sind Durchführende von ethohydraulischen Tests. Die digitale Anwendung beinhaltet Vorgaben und nützliche Informationen, die als Grundlage für eine standardisierte Vorgehensweise während ethohydraulischer Tests und der späteren Datenauswertung zu berücksichtigen sind sowie ein allgemeingültiges Rechenmodul zur Stichprobenplanung.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract .....</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XVII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XIX</b>
<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>XXI</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Forschungsanlass .....	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen.....	3
1.3 Konzept und Vorgehen.....	5
<b>2 Grundlagen der Verhaltensforschung .....</b>	<b>9</b>
2.1 Methoden in der Verhaltensforschung .....	10
2.1.1 Vorüberlegungen bei der Planung verhaltensbiologischer Experimente .....	12
2.1.2 Methoden der Datenerfassung.....	13
2.1.3 Datenaufnahme .....	15
2.1.4 Statistische Datenauswertung.....	17
2.2 Verhaltensforschung in der Fischökologie .....	30
2.2.1 Forschungsfeld „Ethohydraulik“ .....	31
2.2.2 Methoden zur Erfassung von Fischverhalten .....	34
2.2.3 Fischphysiologische Grundlagen .....	42
<b>3 Erarbeitung eines ethohydraulischen Verfahrenskataloges: Grundlegende Untersuchungen .....</b>	<b>57</b>
3.1 Forschungsprojekt „Fischschutz hinter dem Rechen“ (2011-2012).....	58

3.2	Forschungsprojekt „Schaffung der Fischdurchgängigkeit am Ruhr-Wehr Baldeney, Essen“, kurz: Baldeney-Projekt (2012-2015) .....	60
3.3	Verschiedene Freilanduntersuchungen .....	63
3.4	Pilotprojekt „Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechenanlagen an Wasserkraftanlagen (OVer)“ (2015-2018).....	64
<b>4</b>	<b>Erarbeitung eines ethohydraulischen Verfahrenskataloges: OVer als Pilotprojekt .....</b>	<b>66</b>
4.1	Umsetzung eines Verfahrenskataloges ethohydraulisch relevanter Aspekte .....	67
4.1.1	Bauliche Grundlagen .....	67
4.1.2	Verhaltensbiologische Grundlagen .....	80
4.1.3	Chemisch-physikalische Grundlagen .....	101
4.1.4	Tierschutzrechtliche Grundlagen .....	108
4.2	Vorversuche zur weiteren Optimierung des Versuchs-Setups .....	110
4.2.1	Anzuwendende Grundlagen .....	110
4.2.2	Anwendung der Grundlagen auf das OVer-Projekt.....	112
4.3	Hauptversuche .....	117
4.3.1	Versuchsablauf - Anzuwendende Grundlagen und deren Anwendung auf das OVer-Projekt .....	117
4.3.2	Anzahl an Versuchswiederholungen .....	121
4.3.3	Randomisierung .....	122
4.3.4	Datenaufnahme .....	123
4.3.5	Datenaufnahme über Kamerasysteme.....	128
4.3.6	Auswertung ethohydraulisch zählbarer Ereignisse .....	130
4.4	Bewertung und Fazit .....	161
<b>5</b>	<b>Stichprobenplanung: Bestimmung der Anzahl an Probanden für ethohydraulische Untersuchungen.....</b>	<b>162</b>
5.1	Bestimmung des Stichprobenumfangs mittels eines Anteilswertes $p$ (Variante I) .....	162

5.2	Bestimmung des Stichprobenumfangs im Rahmen des Vergleichs zweier Gruppen (Variante II).....	164
<b>6</b>	<b>Digitaler Verfahrenskatalog (diVe) für ethohydraulische Untersuchungen .....</b>	<b>168</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit .....</b>	<b>170</b>
<b>8</b>	<b>Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....</b>	<b>174</b>
8.1	Freilandvalidierung .....	174
8.2	Vervollständigung des Verfahrenskataloges .....	175
8.3	Perspektive .....	176
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>177</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>196</b>
A.1	Steckbrief 1 – Forschungsprojekt „Fischschutz hinter dem Rechen“ .....	197
A.2	Steckbrief 2 – Forschungsprojekt „Schaffung der Fischdurchgängigkeit am Ruhr-Wehr Baldeney, Essen“ .....	198
A.3	Steckbrief 3 - Forschungsprojekt „OVer“ .....	199
A.4	Das Softwarepaket <i>R</i> .....	200
A.5	Checkliste für ethohydraulische Untersuchungen .....	202
	<b>Glossar .....</b>	<b>204</b>
	<b>Danksagung .....</b>	<b>208</b>
	<b>Erklärung .....</b>	<b>210</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Vorgehensweise bei der Bearbeitung der Forschungsgegenstände der vorliegenden Arbeit (graue Zahlen geben die Kapitelnummer an, FG = Forschungsgegenstand).....	8
Abb. 2-1: Generelle Vorgehensweise bei wissenschaftlichen Arbeiten .....	11
Abb. 2-2: Verhaltensbeobachtung von Fischen in einer ethohydraulischen Versuchsrinne .....	14
Abb. 2-3: Verschiedene Möglichkeiten zur Aufnahme quantitativer Daten .....	17
Abb. 2-4: Histogramm der Befischungsergebnisse einer Elektrobefischung eines Fließgewässers im Tiefland, dargestellt sind die Körperlängen der nachgewiesenen Fische in verschiedenen Klassen, n = Anzahl nachgewiesener Fische (Datengrundlage: BUGEFI, unveröffentlichte Daten).....	18
Abb. 2-5: Schematischer Überblick über verschiedene Datenverteilungen .....	19
Abb. 2-6: Zeit in Sekunden bis zum Erreichen der Ziellinie für Lachssmolts mit detaillierter Erklärung der Komponenten eines Boxplots, IQA = Interquartilsabstand, n = Anzahl getesteter Lachssmolts.....	22
Abb. 2-7: Boxplots mit der a) Darstellung von Ausreißern sowie als b) Darstellung mit Minimal- und Maximalwerten der Zeit in Sekunden bis zum Erreichen einer Startlinie von Lachssmolts in einer ethohydraulischen Untersuchung, n = Anzahl getesteter Lachssmolts .....	23
Abb. 2-8: Korrelation des Abflusses in m <sup>3</sup> /s und dem Pegel in cm eines Beispiel-Gewässers .....	24
Abb. 2-9: Überblick über die Säulen der statistischen Auswertung von Daten .....	29
Abb. 2-10: Drei Phasen der Ethohydraulik (Quelle: ADAM & LEHMANN 2011) .....	32
Abb. 2-11: Überblick über verschiedene Möglichkeiten zur Erfassung von Fischverhalten im Freiland (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER) .....	34
Abb. 2-12: Einzelne Komponenten und Funktionsweise des „Riverwatchers“, a) Scannereinheit mit Infrarotsensoren, b) Kameraeinheit (Quelle: MOCKENHAUPT & KLÜBER 2015, verändert).....	36
Abb. 2-13: a) Adaptive-Resolution-Imaging-Sonar (ARIS); Sonaraufnahmen von b) Fischen bzw. c) Aalen und d) Fischschwärmen im Schallkegel (Quelle: SCHMIDT et al. 2018) .....	37

Abb. 2-14: Schematischer Überblick über die Funktionsweise eines Radiotransmitters (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER) .....	38
Abb. 2-15: Schematischer Überblick über die Funktionsweise eines akustischen Senders (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER).....	39
Abb. 2-16: Schematischer Überblick über die Funktionsweise eines passiven Senders (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER).....	40
Abb. 2-17: a) Schema und b) Foto des „Sensor-Fischs“ (Quelle: DENG et al. 2014).....	40
Abb. 2-18: Modellierter Schwimmpfad einer Bachforelle (Quelle: BAW 2018) .....	41
Abb. 2-19: Die wesentlichen Sinnesorgane der Echten Knochenfische (Teleostei) (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER) .....	43
Abb. 2-20: Schematische Darstellung eines Fischauges; grau gepunktet: Akkomodation mittels Lageveränderung der Linse (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER).....	44
Abb. 2-21: Nahaufnahme des Kopfbereiches eines Hechtes ( <i>Esox lucius</i> L.) mit deutlich sichtbarer Linse im Auge (Bild: PIET SPAANS, CC BY-SA ( <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/</a> ), <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PikeHead.JPG">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PikeHead.JPG</a> ) .....	44
Abb. 2-22: Rotaugen ( <i>Rutilus rutilus</i> L.) mit rot gefärbter Iris .....	45
Abb. 2-23: Vertikale Ausdehnung des Sehfeldes eines Fisches (oben) und horizontale Ausdehnung (unten), hellblau = monokulares Sichtfeld; dunkelblau = binokulares Sichtfeld; grau = toter Winkel (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER).....	46
Abb. 2-24: Schematischer Überblick über a) die Lage der verschiedenen Neuromasten auf der Körperoberfläche des Fisches, b) die einzelnen Komponenten der Haarsinneszelle sowie c) der Seitenlinie mit entsprechenden Kanalneuromasten in Vergrößerung (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER).....	48
Abb. 2-25: Flanke eines Döbels mit Seitenlinienorgan (roter Rahmen) ( <i>Squalius cephalus</i> L.) (Bild: BUGEFi, verändert).....	49
Abb. 2-26: Nase mit deutlich erkennbarem Seitenliniensystem ( <i>Chondrostoma nasus</i> L.) (Bild: BUGEFi) .....	50



Abb. 2-27: Sonaraufnahmen eines Aals am Wehrfeld einer Wasserkraftanlage a) beim Sondieren und b) anschließenden Zurückschwimmen ins Oberwasser, blaue Pfeile = Fließrichtung, rote Pfeile = Bewegungsrichtung des Aals. Die Wehrkante befindet sich ca. 5 m rechts des Schallkegels des Sonars (Quelle: BÖCKMANN et al. 2013, verändert) .....	51
Abb. 2-28: Ohrlabrynth eines Fisches (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER) .....	52
Abb. 2-29: Detailaufnahme der Nasenöffnung mit Eintritts- und Austrittsöffnung einer Nase ( <i>Chondrostoma nasus</i> L.) mit Laichausschlag (Bild: BUGEFI) .....	54
Abb. 2-30: Schematische Darstellung der Riechgrube eines Fisches mit Riechepithel (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER) .....	54
Abb. 2-31: Barteln einer Barbe ( <i>Barbus barbus</i> L.) (Bild: BUGEFI) .....	56
Abb. 3-1: Vergleich der Strömungsverhältnisse a) in der realen Wasserkraftanlage und b) des Modells im ethohydraulischen Versuchsaufbau zur Herstellung der situativen Ähnlichkeit (Quelle: KIT & BUGEFI 2012, verändert) .....	59
Abb. 3-2: Luftbild der Stau- und Wasserkraftanlage am Baldeneysee in Essen (Quelle: KÜHLMANN et al. 2015, verändert) .....	61
Abb. 3-3: Schematischer Überblick über die Anordnung der beiden Fischlifte in der Vorkammer im Bereich des ehemaligen Rückpumpbauwerkes der Staustufe Baldeney (Quelle: LEHMANN & KÜHLMANN 2015, verändert) .....	62
Abb. 3-4: Zusammenfassung der Untersuchungsmodule I und II des OVeR-Projektes .....	65
Abb. 4-1: Draufsicht auf den ethohydraulischen Versuchsstand und die Hälterungsanlage im Wasserbaulabor der RWTH Aachen mit entsprechenden Bemaßungen (Quelle: KLOPRIES et al. 2017a, verändert) .....	69
Abb. 4-2: Skizze des Wasserkreislaufs im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (Quelle: KLOPRIES et al. 2017b) .....	69
Abb. 4-3: Verschiedene Komponenten der ethohydraulischen Versuchsrinne im Wasserbaulabor der RWTH Aachen im Rahmen des OVeR-Projekts, a) Strömungsgleichrichter im Einlaufbereich, b) Blick in Strömungsrichtung auf Rechen und Bypassrinne, c) Hälterungsanlage, d) Blick in den Rohbau des seitlichen Bypasses, e) Blick aus dem Beobachtungsraum in die Versuchsrinne mit Rechen und Bypasseingang .....	70

Abb. 4-4: Draufsicht auf die ethohydraulische Versuchsrinne im Wasserbaulabor der RWTH Aachen im Rahmen des OVeR-Projekts (Modul II) (Quelle: BÖCKMANN et al. 2018a, verändert).....	71
Abb. 4-5: Bauliche Modifikationen zur Eliminierung strömungsberuhigter Bereiche - Blick auf die Einstiegsöffnung des Lift-Modells im Wasserbaulabor des KIT (Baldeney-Projekt) a) mit Absatzkante und c) mit Anrampung (Quelle: HOFFMANN & BÖCKMANN 2015, verändert) sowie Blick auf den Modell-Rechen im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt), b) mit Kante am Rechenfuß und d) mit Anrampung am Rechenfuß; rote Pfeile weisen auf strömungsberuhigte Bereiche hin.....	72
Abb. 4-6: Bauliche Modifikationen zur Eliminierung strömungsberuhigter Bereiche im Startbereich der ethohydraulischen Versuchsrinne im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt), a) Vertikale und horizontale Anrampung des Fischschutzgitters am oberstromigen Ende der Versuchsrinne, b) Vertikale Anrampung im Bereich des Starttores .....	73
Abb. 4-7: Aktivität von Quappen in Abhängigkeit von verschiedenen Lichtintensitäten, dargestellt als Anteil an Aufenthalt an verschiedenen Positionen in einer ethohydraulischen Versuchsrinne, n = Anzahl an Probanden, N = Anzahl Untersuchungen (Quelle: KIT & BUGEFi 2012, verändert) .....	74
Abb. 4-8: Zurückgelegte Strecke von Quappen im ethohydraulischen Versuch im Zeitraum von 30 Minuten in Abhängigkeit von der Lichtintensität, n = Anzahl getesteter Probanden, N = Anzahl an Untersuchungen (Daten aus: KIT & BUGEFi 2012) .....	75
Abb. 4-9: a) Abgedunkelter Versuchsstand im Wasserbaulabor des KIT (Baldeney-Projekt, Quelle: BÖCKMANN et al. 2015); b) Abgedunkelter Versuchsstand im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt, Quelle: BÖCKMANN et al. 2018b).....	77
Abb. 4-10: Blick in den Versuchsstand im Wasserbaulabor des KIT (Baldeney-Projekt) mit a) heterogenem Farbmuster und b) einheitlicher Färbung .....	78
Abb. 4-11: Blick in den Versuchsstand im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt) mit einheitlicher Graufärbung .....	78
Abb. 4-12: An die Versuchsrinne angeschlossener Beobachtungsraum im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt) .....	79

Abb. 4-13: Aktivität der getesteten Fischarten, dargestellt als Ein- bzw. Ausschwimmereignisse am Lift-Modell, in Abhängigkeit vom Untersuchungszeitraum, N = Anzahl an Ein- bzw. Ausschwimmereignissen, n = Anzahl an Probanden (Quelle: HOFFMANN & BÖCKMANN 2015, verändert).....	83
Abb. 4-14: Anteil an Lachssmolts, die in das Lift-Modell eingeschwommen (blaue Säule) bzw. ausgeschwommen (rote Säule) sind, n = Anzahl getesteter Probanden, N = Anzahl an Tests (Quelle: BUGEFi & KIT 2016).....	85
Abb. 4-15: Stark vergrößertes Auge eines Blankaales .....	86
Abb. 4-16: Anzahl an Kontakten von Aalen mit einem Fischschutzrechen als Maß für die Motivation in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium (0 = Gelbaal-Stadium, I-III = Zwischenstadien, IV = Blankaal-Stadium), dargestellt als Box-Whisker-Plots, n = Anzahl getesteter Aale, stat. Test: Kruskal-Wallis-Test auf Unterschiede zwischen den verschiedenen Entwicklungsstadien, n. s. = nicht signifikant bei $p \geq 0,05$ (Quelle: FESTER 2017, verändert).....	87
Abb. 4-17: a) Sonar-Aufnahme eines Schwarms Karpfenartiger vor einem Abstiegsanlagen-Modell im Freiland und b) Reusenfang (u. a. Rotaugen) im Abstiegsanlagen-Modell vom 10. Januar 2017 (Quelle: BUGEFi 2017) .....	88
Abb. 4-18: Anteil verschiedener Fischarten an der Gesamtzahl der Individuen in der Fangkammer eines Abstiegsanlagen-Modells (Datenaufnahme: Dezember 2015 bis Januar 2016 sowie Juli 2016 bis Februar 2017), D. Stichling = Dreistachliger Stichling, N = Anzahl Fangkammer-Leerungen, gesamt, n = Anzahl Individuen, gesamt (Daten aus: BUGEFi 2017) .....	89
Abb. 4-19: Junge Lachse a) vor und b) nach Einsetzen der Smoltifizierung .....	90
Abb. 4-20: Gemischter Schwarm aus Rotaugen und Flussbarsch (B) in einem ethohydraulischen Test im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (Modul I, OVeR-Projekt).....	92
Abb. 4-21: Gemischter Schwarm aus Barben, Döbel und Brasse in einem ethohydraulischen Modell im Wasserbaulabor des KIT (Baldeney-Projekt) .....	93
Abb. 4-22: Einschwimmen eines Hechtes (H) und verschiedener Friedfische (Döbel, Rotaugen) in ein ethohydraulisches Modell im Wasserbaulabor des KIT (Baldeney-Projekt).....	94

Abb. 4-23: Gemischter Schwarm aus Gründlingen und Rotaugen in einem ethohydraulischen Versuchsmodell im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (Modul I, OVeR-Projekt) .....	94
Abb. 4-24: Gemischter Schwarm aus Rotaugen und einem Brassen (Br) in einem ethohydraulischen Versuchsmodell im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (Modul I, OVeR-Projekt) .....	95
Abb. 4-25: Individuelle Merkmale der Probanden (hier: Rotaugen), rote Kreise weisen auf markante Merkmale für eine individuelle Unterscheidung der Probanden hin.....	96
Abb. 4-26: Schematischer Überblick über den 2x2 Crossover-Versuchsverlauf der ethohydraulischen Tests des Bundesamtes für Gewässerkunde (Quelle: SCHÜTZ & HENNING 2016) .....	97
Abb. 4-27: Zeit bis zum erstmaligen Erreichen des Versuchsbereichs durch Aale in Abhängigkeit vom Versuchsdurchgang, dargestellt als Box-Whisker-Plots, n = Anzahl an Probanden, Kruskal-Wallis-Test auf Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsdurchgängen, n. s. = nicht signifikant bei $p \geq 0,05$ (Quelle: EICKERLING 2018, verändert).....	99
Abb. 4-28: Artspezifische Wassertemperaturansprüche für verschiedene Entwicklungsstadien von a) Lachs und b) Rotauge, n = Anzahl ausgewerteter Literaturquellen (Quelle: BUGEFi et al. 2012) .....	102
Abb. 4-29: Kühlanlage (Modell TAE EVO tech 161, Rehler Kühleysteme GmbH) in der Wasserbauhalle des IWW, RWTH Aachen, University .....	103
Abb. 4-30: Zeit bis zum Erreichen des Zielbereiches durch Aale in Abhängigkeit von der Wassertemperatur, dargestellt als Box-Whisker-Plots, n = Anzahl an Probanden, U-Test, auf Unterschiede zwischen Kalt- und Warmwasser, n. s. = nicht signifikant bei $p \geq 0,05$ (Quelle: EICKERLING 2018, verändert).....	104
Abb. 4-31: Anzahl an Bereichswechseln für Aale in Abhängigkeit von der Wassertemperatur, dargestellt als Box-Whisker-Plots, n = Anzahl getesteter Aale, stat. Test: U-Test auf Unterschiede zwischen Kalt- und Warmwasser, n. s. = nicht signifikant bei $p \geq 0,05$ (Quelle: EICKERLING 2018, verändert).....	105
Abb. 4-32: Überwachungsmonitor mit Anzeige der wesentlichen Wasserqualitätsparameter (pH-Wert, Sauerstoffgehalt und Wassertemperatur) für die ethohydraulischen Untersuchungen im OVeR-Projekt .....	107

- Abb. 4-33: Hydrodynamisch-numerische Simulation der a) Fließgeschwindigkeiten und Fließvektoren sowie der b) ethohydraulischen Signatur des Fischliftsystems im Baldeney-Projekt bei geöffnetem Fischlift ( $Q_{\text{Lift}} = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Quelle: BÖCKMANN et al. 2015).....111
- Abb. 4-34: Physikalisches Modell im Maßstab 1:3 des Fischliftsystems Baldeney, Momentaufnahmen der Strömung mit Tracer (rote Flüssigkeit) (Quelle: BÖCKMANN et al. 2015).....112
- Abb. 4-35: Versuchsrinne im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (Modul II, OVeR), a) Abzweig zum seitlichen Bypass vor Modifikation, der rote Rahmen weist auf die Bereiche hin, an denen sich Strömungsablösungen bildeten, b) Abzweig zum seitlichen Bypass nach Modifikation, c) abgerundete Kante im Einlaufbereich des Bypasses, d) wellenförmiges Strömungsleitelement (links) sowie abgerundete Kante im Einlaufbereich des seitlichen Bypasses (Fotos: IWW Aachen, verändert).....113
- Abb. 4-36: Darstellung zweier Geometrien des Eingangsbereichs des seitlichen Bypasses im Modul II des OVeR-Projekts (Aufsicht). a) Schema der gewählten Variante für die ethohydraulischen Hauptversuche sowie b) dazugehörige numerische Simulation; c) Schema der Variante mit angepasstem Einlaufbereich und dadurch nachteiliger vergrößerter Wirbelzone sowie d) dazugehörige numerische Simulation (Quelle: BÖCKMANN et al. 2018a).....114
- Abb. 4-37: Ergebnisse der ADV-Messungen in Form eines vertikalen Querschnittes bei Strömungsgeschwindigkeiten von a) 0,3 und b) 0,5 m/s im Bypass (B) und der Hauptrinne (H) im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (Modul II, OVeR-Projekt, Quelle: BÖCKMANN et al. 2018b, verändert).....115
- Abb. 4-38: Ergebnisse der ADV-Messungen in Form eines horizontalen Schnittes, die rote Linie kennzeichnet die Position der Strömungsmessung im Bypasseingang der Versuchsrinne im Wasserbaulabor der RWTH Aachen für a) 0,3 m/s und b) 0,5 m/s (Modul II, OVeR-Projekt, Quelle: BÖCKMANN et al. 2018a, verändert) .....115
- Abb. 4-39: Position des Fischschutzrechens im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt) a) vor Verlegung in Richtung Oberwasser mit Lachssmolts und b) nach Verlegung in Richtung Oberwasser.....116
- Abb. 4-40: Generelle Vorgehensweise bei ethohydraulischen Untersuchungen (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER).....118
- Abb. 4-41: Beispiele der handschriftlichen Datenaufnahme während ethohydraulischer Tests, a) Projekt „Fischschutz hinter dem Rechen“, b) Baldeney-Projekt, hier: Abstiegsuntersuchungen .....124

Abb. 4-42: Benutzeroberfläche der OVeR-App (Modul II): Digitaler Protokollbogen mit a) leeren Eingabefeldern vor Beginn einer Untersuchung (für Erläuterungen 1-11 s. darunter stehende Tabelle) und b) eingegebenen Daten .....	126
Abb. 4-43: Schematische Darstellung (Aufsicht) der ethohydraulischen Versuchsrinne im Wasserbaulabor der RWTH Aachen mit Darstellung der einzelnen Linien zur Protokollierung des Schwimmverhaltens der Probanden im Rahmen des OVeR-Projektes (Modul II) (Quelle: BÖCKMANN et al. 2018b, verändert) .....	127
Abb. 4-44: Benutzeroberfläche der OVeR-App (Modul II): Digitaler Protokollbogen zur Protokollierung von Schwimmwegen und Interaktionen mit dem Rechen a) zu Beginn und b) nach Ende einer Untersuchung .....	127
Abb. 4-45: Positionen der verschiedenen Kameras (K1-4) in der Versuchsrinne während Modul II des OVeR-Projektes .....	129
Abb. 4-46: Momentaufnahmen der einzelnen Kameras (K1-4) im Modul II im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt) .....	129
Abb. 4-47: Zeit bis zum Erreichen der Ziellinie für Aale, Lachse und Rotaugen im OVeR-Projekt (Modul II), dargestellt als Box-Whisker-Plots (ohne Angabe der Extremwerte), n = Anzahl an Probanden, stat. Test: Mann-Whitney-U-Test auf Unterschiede zwischen den Strömungsgeschwindigkeiten ( $v_B$ ), n. s. = nicht signifikant bei $p \geq 0,05$ , * signifikante Unterschiede $p < 0,05$ , *** signifikante Unterschiede $p < 0,001$ .....	135
Abb. 4-48: Bearbeitung der Fragestellungen mithilfe der automatischen Auswertesoftware auf Ebene der deskriptiven und der schließenden Statistik .....	136
Abb. 4-49: Benutzeroberfläche mit Startseite der <i>shiny</i> -Anwendung; im linken Bereich der Oberfläche finden sich verschiedene Auswahlmöglichkeiten (a: Projekt OVeR, b: Neue Daten hochladen, c: Aufbereitete Daten, d: Ereignisse, e: Zeiten der Ereignisse, f: Logistische Regression, g: Lebenszeit-Analyse, h: Stichprobensimulation) .....	138
Abb. 4-50: Anteil an Lachssmolts, die im Modul II des OVeR-Projektes über die Ziellinie des seitlichen Bypasses („Ziel erreicht“), durch den Rechen ins Unterwasser („Rechenpassage“) geschwommen sind oder keines der beiden Ereignisse gezeigt haben („kein Ereignis“), n = absolute Anzahl an Lachssmolts .....	140

- Abb. 4-51: Anteil an Aalen im Modul II des OVeR-Projektes, die über die Ziellinie des seitlichen Bypasses („Ziel erreicht“), durch den Rechen ins Unterwasser („Rechenpassage“) geschwommen sind oder keines der beiden Ereignisse gezeigt haben („kein Ereignis“), in Abhängigkeit von den getesteten Strömungsgeschwindigkeiten,  $n$  = Anzahl getesteter Probanden für die jeweilige Strömungsgeschwindigkeit .....141
- Abb. 4-52: Anteil an a) Aalen und b) Rotaugen im Modul II des OVeR-Projektes, die über die Ziellinie des seitlichen Bypasses („Ziel erreicht“) oder durch den Rechen ins Unterwasser („Rechenpassage“) geschwommen sind oder keines der beiden Ereignisse gezeigt haben („kein Ereignis“), abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und dem Rechenstababstand,  $n$  = Anzahl getesteter Probanden .....142
- Abb. 4-53: Anteil an Lachssmolts im Modul II des OVeR-Projektes, die die Ziellinie des seitlichen Bypasses („Ziel erreicht“) erreicht haben, abhängig von der getesteten Strömungsgeschwindigkeit und dem Rechenstababstand sowie unabhängig vom Rechenstababstand (Durchschnitt),  $n$  = Anzahl getesteter Probanden .....143
- Abb. 4-54: Zeitpunkte der Ereignisse „1 Eingang“ (Überschwimmen der Startlinie), „2 Bypass“ (Überschwimmen der Bypasslinie) und „3 Ziel“ (Überschwimmen der Ziellinie) nach Versuchsstart für a) Lachse und b) Aale im Modul II des OVeR-Projektes; die individuellen Ereignis-Zeitpunkte der einzelnen Probanden sind zur besseren visuellen Unterscheidung farblich markiert .....144
- Abb. 4-55: Zeiten der Ereignisse „1 Eingang“ (Überschwimmen der Startlinie), „2 Bypass“ (Überschwimmen der Bypasslinie) und „3 Ziel“ (Überschwimmen der Ziellinie), wobei das Überschwimmen der Startlinie auf den Zeitpunkt „0“ gesetzt wurde, für Lachse bei einer Strömungsgeschwindigkeit im Bypasseingang von a) 0,3 m/s und b) 0,5 m/s im Modul II des OVeR-Projektes; die individuellen Ereignis-Zeitpunkte der einzelnen Probanden sind zur besseren visuellen Unterscheidung farblich markiert .....145
- Abb. 4-56: Beispiel einer linearen Regressionsfunktion bei binärer abhängiger Variable .....147
- Abb. 4-57: Verlauf der logistischen Regressionsfunktion .....147
- Abb. 4-58: Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie im Bypass durch Lachssmolts, dargestellt als geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervall in Abhängigkeit von verschiedenen Versuchs-Setups ( $v_B$  = Strömungsgeschwindigkeit,  $dist$  = Stababstand,  $Intercept$  = Referenzkategorie), der Kovariablen Körperlänge ( $length\_std$ ) und der Wassertemperatur ( $temp\_std$ ); die Koeffizienten sind in Abhängigkeit vom *Intercept* zu interpretieren .....150

- Abb. 4-59: Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie durch Lachssmolts getrennt nach dem Rechenstababstand, dargestellt als geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervall für die einzelnen Versuchs-Setups ( $vB$  = Strömungsgeschwindigkeit,  $dist$  = Stababstand, Intercept = Referenzkategorie) und der Kovariablen Körperlänge ( $length\_std$ ) und Wassertemperatur ( $temp\_std$ ); die Koeffizienten sind in Abhängigkeit vom *Intercept* zu interpretieren.....151
- Abb. 4-60: Über ein logistisches Regressionsmodell berechnete Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie im Bypass durch Lachssmolts für die Strömungsgeschwindigkeiten 0,3 und 0,5 m/s in Abhängigkeit vom Stababstand sowie im Durchschnitt .....152
- Abb. 4-61: Anteil an über die Bypass-Ziellinie geschwommenen Fischen in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei einer Strömungsgeschwindigkeit im Bypasseingang von 0,3 (rot) und 0,5 (blau) m/s, dargestellt als kumulative Inzidenzrate (Kurven) mit 95%-Konfidenzintervallen (Flächen) für a) Lachse und b) Aale für die verschiedenen Rechenstababstände (Modul II, OVer-Projekt).....155
- Abb. 4-62: a) Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie im Bypass durch Lachssmolts unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes für die Strömungsgeschwindigkeiten von 0,3 und 0,5 m/s in Abhängigkeit vom Stababstand sowie im Durchschnitt; Berechnung mittels Cox-Modell und eventspezifischer Hazard-Rate, b) Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie durch Lachssmolts unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes, dargestellt als geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervall für die einzelnen Versuchs-Setups ( $vB$  = Strömungsgeschwindigkeit,  $dist$  = Stababstand) und der Kovariablen Körperlänge ( $length\_std$ ) und Wassertemperatur ( $temp\_std$ ); die Koeffizienten sind in Abhängigkeit von der Referenzkategorie (Baseline-Hazard, nicht dargestellt) zu interpretieren.....157
- Abb. 4-63: Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie durch Lachssmolts unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes getrennt nach dem Rechenstababstand, dargestellt als geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervall für die einzelnen Versuchs-Setups ( $vB$  = Strömungsgeschwindigkeit,  $dist$  = Stababstand) und der Kovariablen Körperlänge ( $length\_std$ ) und Wassertemperatur ( $temp\_std$ ); die Koeffizienten sind in Abhängigkeit von der Referenzkategorie (Baseline-Hazard, nicht dargestellt) zu interpretieren.....159



Abb. 4-64:	a) Wahrscheinlichkeit, mit der Aale die Ziellinie im Bypass bis zum Versuchsende ( $t = 30$ Minuten) überschwimmen für die Strömungsgeschwindigkeiten 0,3 und 0,5 m/s in Abhängigkeit vom Stababstand sowie im Durchschnitt; Berechnung mittels Cox-Modell und eventspezifischer Hazard-Rate; roter Rahmen weist auf die Ergebnisse des 60 mm Rechens hin, b) Wahrscheinlichkeit, mit der Aale die Ziellinie im Bypass überschwimmen über den Versuchverlauf für die Strömungsgeschwindigkeiten von 0,3 und 0,5 m/s bei einem Stababstand von 60 mm, dargestellt als kumulative Inzidenzrate mit Kovariablen-Einfluss.....	160
Abb. 5-1:	Quantile der Standardnormalverteilung mit p- und dazugehörigen z-Werten (Quelle: BORTZ & LIENERT 2008, verändert) .....	163
Abb. 5-2:	Ausgabe zur Berechnung des Stichprobenumfangs zweier miteinander verglichener Gruppen mittels des Softwareprogramms <i>R</i> und des Befehls <code>power.prop.test</code> .....	165
Abb. 5-3:	Auswahlmöglichkeiten zur Bestimmung des Stichprobenumfangs in der im Rahmen des OVeR-Projektes entwickelten automatischen Auswertungsanwendung; a) Festlegung der Häufigkeiten der Ereignisse, b) Festlegung der Teststärke ( $1-\beta$ ), c) Angabe der Wiederholungen für die Schätzung des Stichprobenumfangs .....	167
Abb. 5-4:	a) Angabe des Stichprobenumfangs (gesamt) und b) Graph des Stichprobenumfangs in Abhängigkeit vom Fehler 2. Art, ermittelt über die im Rahmen des OVeR-Projektes entwickelte automatische Auswertungsanwendung.....	167
Abb. 6-1:	Benutzeroberfläche des digitalen Verfahrenskataloges, Ausschnitt aus den Inhalten des Tabs „Checkliste Verfahrenskatalog“ .....	169
Abb. 6-2:	Benutzeroberfläche des digitalen Verfahrenskataloges, Ausschnitt aus den Inhalten des Tabs „Fischphysiologische Grundlagen“ .....	169

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Überblick über die Aufenthaltsdauer von Aalen in einem Evakuierungssystem mit Beispiel-Berechnung des arithmetischen Mittels .....	20
Tab. 2-2: Überblick über die Aufenthaltsdauer von Aalen (Werte der Größe nach absteigend sortiert) in einem Evakuierungssystem mit Beispiel-Berechnung des Medians.....	21
Tab. 2-3: Überblick über die verschiedenen Begrifflichkeiten beim Hypothesentest mit Beispielen .....	26
Tab. 2-4: Verschiedene Entscheidungsvarianten im Rahmen des Hypothesentests .....	27
Tab. 2-5: Überblick über verschiedene statistische Tests (mit Fallbeispielen) (nach BÜHNER & ZIEGLER 2009, verändert und ergänzt) .....	28
Tab. 4-1: Fischarten, die in das Lift-Modell eingeschwommen (+) bzw. nicht eingeschwommen (-) sind bei abgedunkeltem und nicht abgedunkeltem Versuchsstand, n = Anzahl getesteter Probanden, grau hinterlegte Zellen: Fischart bei Setup nicht verfügbar (Quelle: BÖCKMANN et al. 2015, verändert) .....	76
Tab. 4-2: Überblick über flussaufwärtsgerichtete Wanderzeiten verschiedener Fischarten, Hauptaufstiegszeiten sind dunkelgrün gefärbt (nach DWA 2014, verändert und ergänzt) .....	81
Tab. 4-3: Überblick über flussabwärtsgerichtete Wanderzeiten verschiedener Fischarten, Hauptabstiegszeiten sind dunkelbau gefärbt (nach WASSER UND UMWELT 2010 und EBEL 2018, verändert und ergänzt).....	82
Tab. 4-4: Überblick über verschiedene Wasserqualitätsparameter mit entsprechendem Wertebereich für das OVeR-Projekt.....	107
Tab. 4-5: Überblick über die vier Phasen der ethohydraulischen Versuchsdurchführung und ihre jeweilige Umsetzung im Modul II des OVeR-Projektes .....	120
Tab. 4-6: Anzahl der in den Startbereich eingesetzten und der in den Versuchsbereich eingeschwommen Probanden im Modul II des OVeR-Projektes (* 54 Individuen, die mehrfach getestet wurden) .....	132

Tab. 4-7:	Schlüssel zur Auswahl eines statistischen Tests zur Analyse individueller Messwerte. Beispielhaft grün hervorgehoben sind erfüllte Bedingungen zur Analyse des der Forschungsfrage III des OVeR-Projektes (Modul II) zugrundeliegenden Datensatzes (nach BÜHNER & ZIEGLER 2009, verändert und ergänzt) .....	134
Tab. 4-8:	Auswirkungen positiver und negativer Regressionskoeffizienten auf die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses $P(Y=1)$ (aus: BACKHAUS et al. 2008, verändert), mit $\exp = e^{\beta_0 + \dots + \beta_p x_p}$ mit e (Eulersche Zahl).....	149
Tab. 4-9:	Ergebnisse des statistischen Tests (Gray's Test) auf Unterschiede zwischen den Strömungsgeschwindigkeiten 0,3 und 0,5 m/s im Bypasseingang hinsichtlich der relativen Häufigkeit von Einschwimmereignissen von Lachssmolts in den Bypass unter Berücksichtigung der zeitlichen Dimension für unterschiedliche Stababstände, p-Werte unter 0,05 weisen auf signifikante Unterschiede hin.....	156

## Abkürzungsverzeichnis

ADV	Acoustic-Doppler-Velocimeter
ARIS	Adaptive Resolution Imaging Sonar
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BUGeFi	Büro für Umweltplanung, Gewässermanagement und Fischerei, Bielefeld
DIDSON	Dual-Frequency Identification Sonar
diVe	digitaler Verfahrenskatalog
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
EU-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
FFH-RL	Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie
FuE-Projekt	Forschungs- und Entwicklungs-Projekt
GLM	generalisiertes lineares Modell
ICES	International Council for the Exploration of the Sea
IfÖ	Institut für Ökologie, Kirtorf-Wahlen
IQA	Interquartilsabstand
IR-Licht	Infrarot-Licht
IWG	Institut für Wasser und Gewässerentwicklung
IWW	Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
OVer	Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechenanlagen an Wasserkraftanlagen
KIT	Karlsruher Institut für Technologie

LANUV NRW	Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
MULNV NRW	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
RWTH Aachen	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
TU Darmstadt	Technische Universität Darmstadt
UBA	Umweltbundesamt
WKA	Wasserkraftanlage

## Formelverzeichnis

$\alpha$ -Fehler	Signifikanzniveau, Fehlerwahrscheinlichkeit, Fehler 1. Art
$\beta$ -Fehler	Fehler 2. Art
$\beta_0$	Regressionskonstante (auch Intercept)
$\beta_p$	Regressionskoeffizienten
$C = k$	verschiedene Ereignisse $k$ [Auffinden des Ziels; Rechenpassage]
$d_{kj}$	Anzahl an Fischen, die zum Zeitpunkt $t_j$ , ein Ereignis $k$ (Ziel erreicht, Rechenpassage) zeigten
$e$	Schätzungsgenauigkeit
$\exp$	$e^{\eta_i}$ mit $e = 2,71828183$ (Eulersche Zahl)
$\eta_i$	$\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p$ , aggregierte Einflussstärke
$g(\pi_i)$	Logit-Link
$h^{-1}(\pi_i)$	Inverse der logistischen Verteilungsfunktion
$h(\eta_i)$	logistische Verteilungsfunktion
$I_k(t)$	Kumulative Inzidenzrate
$I_k(t x)$	Kumulative Inzidenzrate mit Kovariablen-Einfluss
$k$	Ereignis (Auffinden des Ziels, Rechenpassage)
$\lambda(t)$	Hazard-Rate
$\lambda_k(t x_i)$	Cox-Modell mit eventspezifischen Hazard-Raten
$\lambda_{0,k}(t)$	eventspezifische Baseline-Hazard
$n$	Stichprobenumfang
$n_j$	Anzahl an Fischen im Versuch, die bis zum Zeitpunkt $t_j$ noch kein Ereignis gezeigt haben

Odds	Chance, Wahrscheinlichkeitsverhältnis, dass das Ereignis $y=1$ im Vergleich zum Ereignis $y=0$ eintritt
$\pi_i$	Eintrittswahrscheinlichkeit, $P(Y=1)$
$p$	Anteil
$P(Y=1)$	Wahrscheinlichkeit, mit der das Ereignis eintritt
$P(Y=0)$	Wahrscheinlichkeit, mit der das Ereignis nicht eintritt
Prob	Wahrscheinlichkeit
$\hat{S}(t_{j-1})$	geschätzter Anteil an Fischen, die noch im Versuch sind, zum Zeitpunkt $(t_{j-1})$ mit $1 - \frac{d_j}{n_j}$ ; $d_j$ : gesamte Anzahl an Fischen, die ein Ereignis $k$ zeigten
$t$	Start-Zeit
$T$	Zeitpunkt des Ereigniseintritts (Überschwimmen der Ziellinie bzw. Rechenpassage)
$T < t$	das Ereignis tritt vor dem Zeitpunkt $t$ ein
$t + \Delta t$	Zeit, die sich dem Ende des Versuches nähert
$\Delta t$	Zeit, die gegen 0 geht (Ende des Versuches 30 Minuten)
$\bar{x}_{arithm}$	arithmetisches Mittel
$\bar{x}_{med}$	Median
$x_p$	unabhängige Einflussgröße (z. B. Strömungsgeschwindigkeit, Wassertemperatur o.ä.)
$y_i$	lineares Regressionsmodell
$z$	Quantil der Standardnormalverteilung bei $1-\alpha/2$

# 1 Einleitung

## 1.1 Forschungsanlass

Die Durchgängigkeit von Fließgewässern ist für die langfristige Entwicklung stabiler Populationen diadromer Wanderfischarten wie Aal (*Anguilla anguilla* L.) und Lachs (*Salmo salar* L.) neben einer guten Gewässergüte und einer intakten Gewässerstruktur unerlässlich. Aber auch für potamodrome Arten ist die Durchgängigkeit der Fließgewässer unter anderem für das Auffinden von geeigneten Laich-, Aufwuchs- oder Nahrungshabitaten essentiell. Barrieren in Fließgewässern können diese Wanderungen verzögern oder unterbrechen. Müssen Fische bei ihren klein- oder großräumigen Wanderungen beispielsweise eine Wehr- oder Wasserkraftanlage passieren, kann dies zu nachhaltigen Schädigungen führen (HADDERINGH & BAKKER 1998, LARINIER & TRAVADE 2002, BRUIJS et al. 2003, DWA 2005, MUNLV NRW 2005, WINTER et al. 2006, WINTER et al. 2006, EBEL 2008, CUCHET et al. 2012, EBEL 2013, DWA 2014, SCHMALZ et al. 2015, MUELLER et al. 2017).

Unter Berücksichtigung weiterer Beeinträchtigungen, wie physikalisch-chemische Aspekte, ist es möglich, dass regionale Populationen in ihrem Bestand gefährdet werden oder überregional sogar aussterben können (FREYHOF 2009, LANUV NRW 2011). Dies betrifft insbesondere diadrome Fischarten, die für ihre erfolgreiche Reproduktion weite Distanzen zurücklegen müssen und dabei zwischen dem Süß- und dem Salzwasser wechseln. Neben dem Aal und dem Lachs, dessen natürliche Bestände in den letzten Jahrzehnten zunehmend zurückgegangen sind (BILOTTA et al. 2011, WOLTER 2015, LENDERS et al. 2016, ØKLAND et al. 2016, IKSR 2018, ICES 2018, DEKKER 2018), trifft dies auch auf die FFH-Arten Flussneunauge (*Lampetra fluviatilis* L.) und Meerneunauge (*Petromyzon marinus* L.) zu (FREYHOF 2009, HOFFMANN 2010, UBA 2011, FREIE UND HANSESTADT HAMBURG 2015).

In Bezug auf die aufwärtsgerichtete Durchgängigkeit ist nach Jahren der Forschung und der Bewertung entsprechender Daten aus Monitoring-Untersuchungen ein Stand der Technik erreicht, bei dem unter Beachtung wesentlicher Bemessungsgrundlagen ein hohes Maß an Funktionalität erreicht wird (DVWK 1996, MUNLV NRW 2005, DWA 2014). In Bezug auf die abwärtsgerichtete Durchgängigkeit sind z. Z. jedoch noch Fragen offen (VDFF 2018, NAUMANN et al. 2018). Als Abstiegs- und Schutzinstrumente fungieren gegenwärtig sogenannte Rechen-Bypass-Systeme (EBEL 2013, EBEL et al. 2015, LEHMANN et al. 2016, BÖCKMANN et al. 2018a). Der Bau dieser Systeme als Schutzinstrument kann dazu beitragen, abwanderwillige Fische mittels eines Rechens daran zu hindern, in für sie gefährliche Bereiche (beispielsweise Turbine einer Wasserkraftanlage) einzuschwimmen und stattdessen einen alternativen, ungefährlicheren Abstiegsweg (beispielsweise Bypass) zu nutzen (EBEL 2008). Während Bypass-Systeme, die mit einem Horizontalrechen<sup>1</sup> kombiniert werden, schon vergleichsweise weit

---

<sup>1</sup> Rechen mit horizontal ausgerichteten Stäben, auch als Schrägrechen bezeichnet



entwickelt sind (Durchflüsse von bis zu 50 m<sup>3</sup>/s Ausbauwassermenge<sup>2</sup>) (EBEL 2013, UBA 2015), existieren für Vertikalrechen<sup>3</sup>, die in Verbindung mit einem Bypass betrieben werden, kaum Erfahrungen bzw. Umsetzungen an Wasserkraftanlagen mit höheren Durchflussmengen (ab 30 m<sup>3</sup>/s) (UBA 2015, VDFF 2018). Vor dem Hintergrund fehlender Forschungsergebnisse und entsprechender Systemerfahrungen besteht die Gefahr, dass Systeme gebaut werden, die nicht den erwarteten positiven Effekt auf den Fischabstieg haben (MUNLV NRW 2005). Für die Entwicklung und Bemessung solcher Abstiegsanlagen ist es daher wichtig, das Verhalten von Fischen in Bezug auf die wasserbaulichen Strukturen zu berücksichtigen. Die Untersuchung vor dem Bau von fischrelevanten Schutz- und Durchgängigkeitsstrukturen außerhalb des bereits publizierten Standes der Technik ist speziell in Nordrhein-Westfalen dahingehend geregelt, dass mittels geeigneter Untersuchungen vorab eine hohe Funktionalität des Systems bzw. einzelner Systemkompartimente nachgewiesen werden muss (MUNLV NRW 2005, MUNLV NRW 2009a). Das Mittel der Wahl sind hier neben den rein ingenieurtechnischen Methoden (wie beispielsweise numerische oder physikalische Strömungsmodellierungen) sog. ethohydraulische Untersuchungen.

Das interdisziplinäre Forschungsfeld der Ethohydraulik wurde in den Jahren 2007 bis 2009 entwickelt (LEHMANN et al. 2009, ADAM & LEHMANN 2011). Es ermöglicht, das Verhalten von Fischen unter festgelegten hydraulischen Situationen im Labor zu beobachten, zu analysieren und auf das Freiland, also z. B. auf reale Wasserkraftanlagen, zu übertragen (ADAM & LEHMANN 2011, LEHMANN 2017). Die Ethohydraulik ist inzwischen in der Überprüfung von Fischverhaltensweisen unter standardisierten Bedingungen nicht nur in Bezug auf den Bau von Fischabstiegsanlagen sondern auch im Falle von (Sonder-) Bauweisen bei Fischaufstiegsanlagen fest etabliert und als gültiger Funktionsnachweis anerkannt (MUNLV NRW 2005, MUNLV NRW 2009a).

Der Ansatz von Adam und Lehmann folgt den klassischen Methoden der Verhaltensbiologie. Hierbei steht die Beschreibung des Verhaltens der Fische auf qualitativer Ebene im Vordergrund (LEHMANN et al. 2009, KAPPELER 2012). Diese Methode hat zahlreiche zielführende Erkenntnisse erbracht, die unter anderem 2011 in dem Lehrbuch „*Ethohydraulik*“ mündeten. Im Abschlussprozess zur Bearbeitung des DBU-Projektes „*Ethohydraulik - eine Grundlage für naturschutzverträglichen Wasserbau*“ zeigte sich jedoch, dass es der bisherigen Vorgehensweise bei der Auswertung ethohydraulischer Daten „an methodenkonformen statistischen Auswertungs- und weiterführenden Analyseverfahren mangelt“ (LEHMANN et al. 2009). Bislang folgte der Ansatz keiner allgemeingültigen, standardisierten Vorgehensweise in Bezug auf die Datenaufnahme und die spätere quantitative Auswertung ethohydraulisch zählbarer Daten, was aktuell von verschiedenen Seiten als zukunftsorientierte Perspektive gefordert wird (WEY et al. 2016, WEICHERT et al. 2016, SCHÜTZ & HENNING 2017, EBEL 2017, NAUMANN et al. 2018).

---

<sup>2</sup> Maximale Wassermenge, die bei einer Wasserkraftanlage durch die Turbinenanlage geführt werden kann

<sup>3</sup> Rechen mit vertikal ausgerichteten Stäben

Auch im Verlauf der Geschichte der Verhaltensbiologie anderer Forschungsdisziplinen, wie beispielsweise der Ornithologie oder der Verhaltensanalyse bei großen Säugetieren, wird deutlich, dass zunächst die qualitative Beschreibung von Verhaltensbeobachtungen mit deren Interpretation eine wichtige Rolle spielte (NAGUIB 2006, IMMELMANN 1976). Mittlerweile findet sich jedoch eine stark quantitativ arbeitende wissenschaftliche Disziplin, „die ein Spektrum spezieller oft experimenteller Methoden zur Erfassung von Verhaltensweisen entwickelt hat“ (NAGUIB 2006, MARTIN & BATESON 2007, DAVIES et al. 2012).

Der Bau von Anlagen zur Herstellung der Fischdurchgängigkeit ist in der Regel mit betrieblichen Restriktionen und damit auch ökonomischen Einbußen für Gewässernutzer verbunden. Dies trifft in besonderem Maße auf Wasserkraft- und andere Anlagenbetreiber zu, welche Wasser aus dem Fließgewässer nutzen und zum Antrieb einer Turbine oder als Prozess- bzw. Kühlwasser verwenden. Im Spannungsfeld zwischen der energiepolitisch gewollten Nutzung der regenerativen Energiequelle „Wasserkraft“ und den Rahmenbedingungen einer Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL 2000/60/EG 2000) ist es von besonderer Bedeutung, dass Anlagen und Strukturen zum Fischschutz, Fischeauf- und -abstieg ein hohes Maß an Effizienz aufweisen, da im Falle einer mangelhaften Funktionsfähigkeit hohe Investitionen für die Optimierung bzw. Neuplanung von Anlagen auf den Betreiber zu kommen können. Somit gilt: Je besser die Erkenntnisse aus Entwicklungen und Untersuchungen im Labor auf reale Standorte übertragen werden können, desto geringer wird der i. d. R. kostspielige Validierungs- und Optimierungsaufwand im Freiland.

## **1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen**

Für eine künftige allgemeingültige Vorgehensweise bei ethohydraulischen Untersuchungen ist es Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit, den Grundstein für die Weiterentwicklung des bisherigen ethohydraulischen Ansatzes durch die Implementierung einer statistischen Phase insbesondere im Hinblick auf die Datenaufnahme sowie die Auswertung von ethohydraulisch zählbaren Daten zu legen. Ziel der Arbeit ist es, eine standardisierte Methodik zu entwickeln, die es ermöglicht, das Verhalten von Fischen nachvollziehbar aufzunehmen und auf statistisch verifizierbarer Ebene auszuwerten. Mögliche im Labor generierte Artefakte werden weiter eingegrenzt. Insgesamt wird so eine zuverlässigere Übertragbarkeit der Befunde auf das Freiland gewährleistet.

Bei der Einhaltung von Randbedingungen, die aus ethohydraulischen Tests abgeleitet werden, kann damit ein hohes Maß an Planungssicherheit und Effizienz gewährleistet werden. Dies ist insbesondere für Wasserkraft- bzw. Wehrbetreiber von besonderem Interesse, die an Standorten mit hohen Planungsrestriktionen Sonderbauweisen in Bezug auf den Fischeaufstieg sowie den Fischabstieg zur Herstellung der Durchgängigkeit umsetzen müssen. Über eine standardisierte Vorgehensweise kann ein statistisch abgesicherter Transfer der Laboruntersuchungen in das Freiland gewährleistet werden (Forschungsgegenstand I).

Darüber hinaus soll eine Stichprobenplanung zu Beginn der ethohydraulischen Untersuchungen erlauben, Aussagen über die Anzahl an Versuchstieren, die für statistisch abgesicherte Ergebnisse nötig sind, zu tätigen. Dies geschieht vor allem vor dem Hin-

tergrund strenger werdender Tierschutzgesetze und der damit verbundenen Vermeidung hoher Tierzahlen für die Absicherung statistisch signifikanter Ergebnisse. Auch für eine frühzeitige Kosteneinschätzung ist dieser Vorgang von Bedeutung (Forschungsgegenstand II).

Die oben genannten Ausführungen münden in den folgenden Forschungsfragen, die als Leitfaden für die methodische Vorgehensweise dienen:

**Forschungsfrage I:**

Welches sind die ausschlaggebenden Kriterien bei der Entwicklung einer standardisierten Vorgehensweise für ethohydraulische Untersuchungen, um einen statistisch abgesicherten Transfer der Laboruntersuchungen in das Freiland zu gewährleisten?

**Forschungsfrage II:**

Ist es möglich mithilfe einer frühzeitigen Stichprobenplanung, die Anzahl an Versuchstieren bereits vor Beginn der ethohydraulischen Untersuchungen zu ermitteln und so den Untersuchungsumfang möglichst frühzeitig und zuverlässig einzuschätzen?

Aus den Forschungsfragen haben sich zwei Forschungsgegenstände entwickelt, die die Grundlage der vorliegenden Arbeit darstellen:

**Forschungsgegenstand I:**

Erarbeitung eines Verfahrenskataloges zur standardisierten Vorgehensweise bei ethohydraulischen Untersuchungen und Implementierung einer statistischen Auswertungsmethodik zählbarer ethohydraulischer Ereignisse.

**Forschungsgegenstand II:**

Erarbeitung einer Stichprobenplanung zur frühzeitigen und zuverlässigen Bestimmung der Anzahl an benötigten Versuchstieren.

### 1.3 Konzept und Vorgehen

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Weiterentwicklung des interdisziplinären Forschungsfeldes der Ethohydraulik leisten. Dabei bilden die in Kap. 1.2 genannten Forschungsgegenstände den Schwerpunkt.

Das zentrale Ziel des ersten Forschungsgegenstands ist die Entwicklung einer standardisierten Vorgehensweise für die Datenaufnahme und spätere statistische Auswertung von ethohydraulischen Untersuchungen. Neben Daten und Erkenntnissen, die im Rahmen eines Pilotprojektes<sup>4</sup> und in weiteren flankierenden Forschungsprojekten erhoben wurden, diente die relevante Literatur zum aktuellen Stand der Forschung als Grundlage.

Bei dem Pilotprojekt handelt es sich um das Forschungsvorhaben zum „Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechenanlagen an Wasserkraftanlagen“, kurz OVeR, das von der innogy SE finanziert und anteilig vom Land Nordrhein-Westfalen gefördert wurde. Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen, University (Prof. Schüttrumpf) durchgeführt.

Die zu entwickelnde standardisierte Vorgehensweise, die künftig in den bestehenden Ethohydraulik-Ansatz implementiert werden soll, um die statistische Auswertung ethohydraulisch zählbarer Ereignisse zu gewährleisten, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit beispielhaft anhand der Versuchsdurchführung, Datenaufnahme und -auswertung des o. g. OVeR-Projektes angewendet. Dabei wird jeweils zunächst eine Übersicht über die bisherigen Erkenntnisse aus eigenen ethohydraulischen Untersuchungen und Literaturquellen aufgeführt. Darauf folgend wird jeweils die Anwendung dieser Grundlagen im OVeR-Projekt beschrieben und entsprechend der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit methodisch weiterentwickelt.

Als Beispiele zu berücksichtigender Grundlagen sind artspezifische Motivationszeiträume der Versuchsfische sowie die Wahl der Testgruppenszusammensetzung zu nennen, aber auch Empfehlungen zur Einstellung physikalischer Randbedingungen, wie die Wassertemperatur in den Hälterungsbecken, sind zu beachten. Im Wesentlichen wird zwischen Vorversuchen und den darauf aufbauenden Hauptversuchen unterschieden. Dieser zweistufige Versuchsprozess ist für ethohydraulische Untersuchungen, die bislang nicht untersuchte Strukturen zum Gegenstand haben, unerlässlich. Es werden Leitlinien für Vorversuche gegeben, deren Ziel es ist, festzustellen, ob die beobachtbaren Reaktionen der Fische klar auf den zu untersuchenden Faktor zurückgeführt und andere Ursachen ausgeschlossen werden können. Auch für Hauptversuche erfolgt eine stichpunktartige Beschreibung der Vorgehensweise. Hier finden sich beispielsweise praktische Handlungsanleitungen für den Versuchsablauf ethohydrauli-

---

<sup>4</sup> Pilotprojekt OVeR = Ethohydraulische Untersuchung, in der erstmalig die standardisierte Vorgehensweise für die Datenaufnahme und statistische Auswertung von ethohydraulisch zählbaren Ereignissen erarbeitet wurde

scher Untersuchungen und ein Schlüssel zur Auswahl passender statistischer Tests im Zuge der Datenauswertung. Neben der herkömmlichen deskriptiven Darstellungsweise der Ergebnisse wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Statistik der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München (Prof. Kauermann) ein statistisches Auswertetool entwickelt, das Aussagen darüber zulässt, ob das beobachtete Verhalten der getesteten Fische reproduzierbar, demnach also repräsentativ für die Population bzw. Art ist und so abgesicherte Erkenntnisse für den Transferprozess ins Freiland liefert. Die Ergebnisse werden dabei sowohl in deskriptiver Form als auch mittels schließender Statistik dargestellt.

Im Rahmen des Forschungsgegenstandes II wurde basierend auf dem Datensatz des OVeR-Projekts, eine allgemeingültige Stichprobenplanung erarbeitet, die es bereits im Vorfeld eines Versuchs ermöglicht, Aussagen darüber zu treffen, wie viele Versuchstiere notwendig sind, um statistische Unterschiede bzw. einen Einfluss eines getesteten Parameters auf das Verhalten nachweisen zu können, wenn diese vorhanden sind. So bietet die Stichprobenplanung die Möglichkeit, bereits zu Beginn der Planung die Anzahl an benötigten Versuchstieren zu ermitteln und frühzeitig eine verlässliche Kosten- und Zeitabschätzung für die Untersuchungen abzugeben. Die Berechnung ist unabhängig davon, ob die Untersuchungen im Labor oder im Freiland durchgeführt werden.

Das Produkt der vorliegenden Arbeit ist ein (digitaler) Verfahrenskatalog (diVe), der die standardisierte Vorgehensweise im Rahmen ethohydraulischer Untersuchungen darstellt und Vorgaben macht, welche Randbedingungen für die einzelnen Tests zu erfüllen sind, um deren Erkenntnisse abzusichern. Auch die o. g. Stichprobenplanung ist in diVe integriert.

Im Folgenden findet sich eine kurze Beschreibung der Gliederung der vorliegenden Forschungsarbeit:

Nachdem in Kapitel 1 der Forschungsanlass sowie die Forschungsgegenstände erörtert werden, gibt Kapitel 2 zunächst einen Überblick über die allgemeinen Methoden der Verhaltensbiologie. Es wird erläutert, welche Vorüberlegungen im Rahmen der Planung und späteren statistischen Auswertung von Experimenten zu berücksichtigen sind. Weiter wird ein Einblick in die Methoden der statistischen Datenaufnahme und die Möglichkeiten der verschiedenen Auswertungsweisen gegeben. Im weiteren Verlauf wird das Forschungsfeld der Ethohydraulik nach ADAM & LEHMANN (2011) näher erläutert (Kap. 2.2.1). Kapitel 2.2.2 gibt einen Überblick über verschiedene Methoden, mit denen das Verhalten von Fischen - neben Laboruntersuchungen - insbesondere im Freiland aufgenommen werden kann.

Im Weiteren steigt die Arbeit tiefer in die Erarbeitung von Grundlagen für die Erstellung eines ethohydraulischen Verfahrenskataloges ein. Wichtig dabei ist das Wissen über die physiologischen Mechanismen, die das Verhalten von Fischen bedingen. Dementsprechend stellt das Kapitel 2.2.3 die die Ethohydraulik tangierenden Grundlagen der Fischphysiologie dar.

Kapitel 3 stellt die wesentlichen Projekte vor, welche die Grundlage für die in der vorliegenden Arbeit dokumentierte Erarbeitung eines ethohydraulischen Versuchsstandards bilden.

Kapitel 4 stellt die Anwendung der wesentlichen Grundlagen für eine standardisierte Vorgehensweise und spätere statistische Datenauswertung anhand des OVeR-Projektes dar. Bei der Planung der im OVeR-Projekt (Untersuchungsmodul II) durchgeführten ethohydraulischen Tests wurden die zuvor dargestellten Grundlagen zum wissenschaftlichen Arbeiten und zur Fisch-Physiologie (vgl. Kap. 2) sowie Erkenntnisse aus verschiedenen ethohydraulischen Untersuchungen (vgl. Kap. 3) angewendet. Der dabei entwickelte Verfahrenskatalog dient als Grundlage für einen allgemeingültigen Labor-Standard für die Durchführung und statistische Auswertung ethohydraulischer Untersuchungen. Kapitel 4.1 listet (1) bauliche Grundlagen, die verschiedene Kriterien der Hardware (u. a. Gestaltung der Versuchsrinne) betreffen, sowie (2) verhaltensbiologische und (3) chemisch-physikalische Grundlagen auf, die im Rahmen ethohydraulischer Tests berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus wird (4) ein Überblick über die Berücksichtigung rechtlicher Grundlagen für die Untersuchungen gegeben. Auch Handlungsanleitungen für Vorversuche zur Optimierung eines gewählten Setups (Kap. 4.2) und für Hauptversuche (Kap. 4.3) werden dargestellt. In Kapitel 4.3.6 findet sich eine Beschreibung der Vorgehensweise bei der Auswertung ethohydraulisch zählbarer Ereignisse. Die auf Grundlage des Datensatzes des OVeR-Projektes erarbeitete automatische Auswertesoftware wird in Kapitel 4.3.6.3 dargestellt.

Kapitel 5 widmet sich der Stichprobenplanung im Vorfeld ethohydraulischer Tests. Dabei werden verschiedene Varianten dargestellt, die es ermöglichen, die benötigte Anzahl an Probanden für die jeweiligen Tests bereits im Vorfeld der Untersuchungen verlässlich zu bestimmen.

Die erlangten Erkenntnisse fließen als Grundlage in einen (digitalen) Verfahrenskatalog (diVe) für ethohydraulische Untersuchungen ein (Kap. 6), der mittels einer Web-Anwendung (R CORE TEAM 2017) digitalisiert wurde. Die wesentlichen Komponenten des Katalogs werden in Kapitel 6 zusammenfassend dargestellt. Auch die in Kapitel 5 erarbeiteten Varianten zur Stichprobenplanung sind in der Anwendung integriert.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der bearbeiteten Forschungsgegenstände zusammengefasst und bewertet. In Kapitel 8 wird der weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarf abgeleitet.

Die nachfolgende Abbildung gibt einen zusammenfassenden Überblick über die konzeptionelle Vorgehensweise im vorliegenden Forschungsprojekt mit entsprechenden Kapitelangaben.

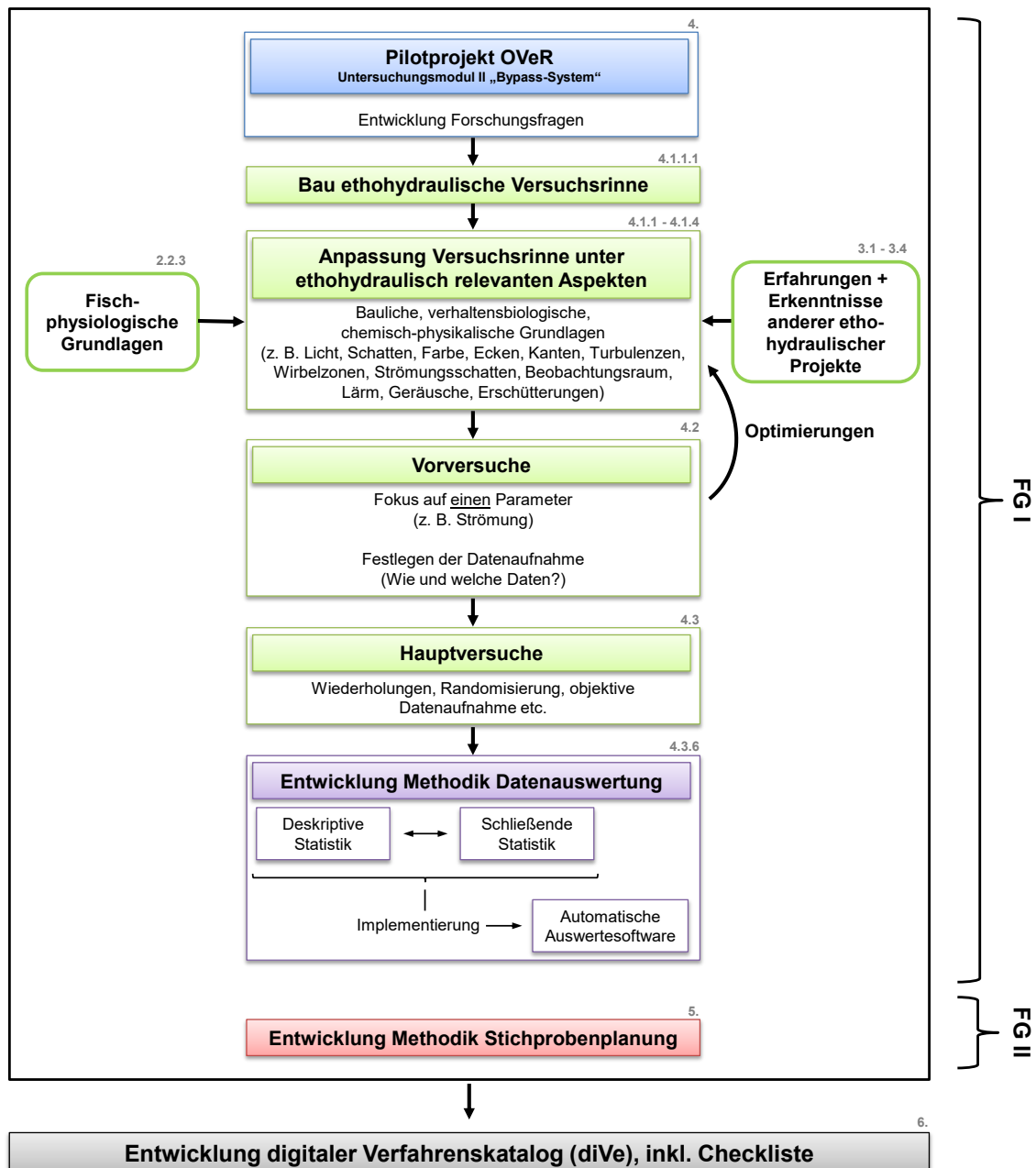


Abb. 1-1: Vorgehensweise bei der Bearbeitung der Forschungsgegenstände der vorliegenden Arbeit (graue Zahlen geben die Kapitelnummer an, FG = Forschungsgegenstand)

## 2 Grundlagen der Verhaltensforschung

Das Forschungsfeld der Verhaltensbiologie ist eine Teildisziplin der Biologie, das sich mit dem Verhalten von Tieren und Menschen beschäftigt. Dabei stehen die Beobachtung von Verhalten, der Vergleich einzelner Individuen oder Arten und das Entstehen bestimmter Verhaltensweisen im Kontext evolutionärer Entwicklungen im Vordergrund (Warum wurde ein bestimmtes Verhalten entwickelt?). Eine neue und immer wichtiger werdende praktische Bedeutung gewinnt die Verhaltensforschung dabei im Rahmen der Planung und Umsetzung von Maßnahmen zum Erhalt und Schutz von Tieren (KAPPELER 2012). So sind beispielsweise Kenntnisse des natürlichen Sozial- und Paarungsverhaltens oder der Nahrungs- und Habitatwahl bestimmter Tierarten essentiell zur Umsetzung von Artenschutzprogrammen. Bei der Ausweisung von Schutzgebieten müssen Informationen über Migrations- und Dispersionsmuster sowie Raum- und Strukturansprüche vorliegen (CARO & SHERMANN 2011). Speziell im Bereich des Fischschutzes ist es von ausschlaggebender Bedeutung, das Migrationsverhalten der Tiere und deren Auslöser zu kennen, um beispielsweise entsprechende Maßnahmen zur Herstellung der Durchgängigkeit der Gewässer zu entwickeln.

Die systematische wissenschaftliche Verhaltensforschung hat ihren Ursprung in der Mitte des 19. Jahrhunderts (KAPPELER 2012). Einen bedeutenden Grundstein dafür legte der Evolutionsbiologe Charles R. Darwin, indem er erstmalig die Funktion bestimmter Verhaltensweisen im Kontext der Artentwicklung analysierte und auf wissenschaftlicher Ebene systematisch erforschte (KAPPELER 2012).

Im Weiteren entwickelten sich zwei weitestgehend voneinander unabhängige Ansätze der Verhaltensbiologie. In Amerika entwickelte sich Anfang des 20. Jahrhunderts der Behaviorismus, der u. a. von John B. Watson etabliert wurde. Der Behaviorismus geht davon aus, dass das Verhalten auf ein Reiz-Reaktionsgeschehen reduziert werden kann, wobei das Lernen und die Erfahrung elementare Rollen spielen. Dagegen finden genetisch veranlagte Verhaltensweisen keine Berücksichtigung. Wichtige Arbeiten zum Behaviorismus wurden u. a. von Iwan Pawlow erarbeitet (vgl. PAWLOW 1953-1956, PAWLOW 1972). Untersuchungen fanden unter streng kontrollierten Bedingungen im Labor statt, dabei beschränkten sich die Experimente auf wenige Arten. Andere Ansätze kritisierten dabei, dass die Organismen nicht in ihrer natürlichen Umgebung untersucht wurden (CAMPBELL & REECE 2003, KAPPELER 2012).

In den 1930er Jahren entwickelte sich in Europa die klassische Ethologie (CAMPBELL & REECE 2003). Inhaltliche und methodische Grundlage dieses Ansatzes war eine ausführliche Beschreibung von Verhaltensmustern und -abläufen von Tieren in ihrem natürlichen Lebensraum. Der daraus erarbeitete Katalog arttypischer Verhaltensweisen, auch als Ethogramm bezeichnet, stellt die Arbeitsgrundlage für vergleichende Analysen dar (KAPPELER 2012).

Als Begründer der vergleichenden Verhaltensforschung gilt Konrad Lorenz, der die gesammelten Einzelbeobachtungen in einem umfassenden Modell miteinander verknüpfte (LORENZ 1978, KAPPELER 2012). Als weitere Begründer der klassischen Verhaltensbiologie gelten ebenso Karl von Frisch und Nikolaas Tinbergen. 1973 erhielten die drei Forscher in Stockholm den Nobelpreis. Die Arbeiten der Forscher lie-



ferten wichtige Grundlagen für das in den 1970er Jahren entstandene Forschungsgebiet der Verhaltensökologie, das sich insbesondere mit der evolutionären Anpassung des Verhaltens unter Berücksichtigung der natürlichen ökologischen Bedingungen beschäftigt (CAMPBELL & REECE 2003). Dabei nahm die experimentelle Aufnahme quantitativer Daten und die Berücksichtigung mathematischer Methoden und Modelle mehr und mehr an Bedeutung zu (KREBS & DAVIES 1984, IMMELMANN et al. 1996, KREBS & DAVIES 1996, KAPPELER 2012). Insbesondere der Biologe Robert H. MacArthur trug maßgeblich zur Etablierung mathematischer Methoden in der Ökologie bei (vgl. FRETWELL 1975, KREBS & DAVIES 1984, BEATTY 2012). Viele der erarbeiteten Forschungserkenntnisse auf dem Feld der Verhaltensökologie wurden und werden in einem fortlaufend aktualisierten Buch von den beiden Verhaltensforschern John Krebs und Nicholas Davies zusammengefasst (vgl. KREBS & DAVIES 1984, KREBS & DAVIES 1996, DAVIES et al. 2012, KAPPELER 2012).

## 2.1 Methoden in der Verhaltensforschung

Das Verhalten eines Organismus ist von vielen verschiedenen Faktoren abhängig. Allgemein lässt sich das Verhalten auf einer proximalen (mechanistischen) und einer ultimativen (funktionellen) Ebene erklären. Bei proximalen Faktoren handelt es sich um solche, die das Verhalten eines Organismus unmittelbar auslösen, hierzu zählen interne Faktoren wie physiologische Mechanismen, z. B. neurobiologische oder genetische Prozesse. Im Falle von ultimativen Faktoren geht es darum, welche Konsequenz bzw. welchen Anpassungswert ein bestimmtes Verhalten für den Überlebens- bzw. Fortpflanzungserfolg eines Individuums hat. Als sogenannte externe Faktoren sind hierbei ökologische und soziale Variablen zu nennen.

Zum besseren Verständnis, wie Verhaltensweisen nach den beiden oben genannten Ansätzen erklärt werden können, soll im Folgenden beispielhaft die Frage beantwortet werden, warum die Fortpflanzungszeit des Dreistachligen Stichlings (*Gasterosteus aculeatus* L.) im Frühling bzw. Frühsommer stattfindet. Die proximale Frage, also die Außenreize betreffend, die das Fortpflanzungsverhalten auslösen, kann hierbei u. a. mit der Einwirkung der zunehmenden Tageslänge (Reiz) auf die Photorezeptoren des Stichlings beantwortet werden (vgl. BORG et al. 2004). Die ultimale Frage (nach der evolutionären Bedeutung) ist durch das bessere Nahrungsangebot und die damit verbundene günstigere Überlebenswahrscheinlichkeit der Larven und Jungfische zu erklären.

Die beiden Ebenen, die für das Verhalten von Organismen ursächlich sind und dieses beeinflussen, tangieren damit eine ganze Bandbreite an Forschungszweigen, von der Molekulargenetik bis hin zur Ökosystemforschung. Auf dem Feld der Verhaltensbiologie findet sich dementsprechend eine Vielzahl an Methoden, mit denen das Verhalten eines Organismus auf verschiedenen Ebenen erforscht werden kann (NAGUIB 2006). Eine stringente wissenschaftliche Methodik ist jedoch allen Forschungsfeldern gemein.

Die generelle Vorgehensweise bei wissenschaftlichen Arbeiten ist zunächst das Herausarbeiten einer Fragestellung auf der Grundlage eines beobachteten Ereignisses. Aus dieser Frage wird wiederum eine Hypothese abgeleitet. Damit steht das Grundgerüst für die Fragestellung an ein Experiment. Nach dem Durchführen

eines reproduzierbaren und nachvollziehbaren Experiments werden die Ergebnisse statistisch ausgewertet, um nachweisen zu können, ob die beobachteten Effekte signifikant sind und damit ggf. ein Einfluss eines beobachteten Parameters auf die gemessene Variable (z. B. ein bestimmtes Verhalten) nachgewiesen werden kann. Die Ergebnisse werden statistisch ausgewertet und in Beziehung zur anfänglich formulierten Hypothese gesetzt, die folglich angenommen oder abgelehnt wird (NAGUIB 2006, KAPPELER 2012). Im letzten Schritt wird die Fragestellung der Studie dann auf Grundlage der experimentell gewonnenen Erkenntnisse und unter Berücksichtigung des Forschungskontextes diskutiert. So können Aussagen darüber getroffen werden, welchen Erkenntnisgewinn die Ergebnisse zu übergeordneten Theorien liefern. Abb. 2-1 gibt einen Überblick über die generelle Vorgehensweise bei wissenschaftlichen Arbeiten.

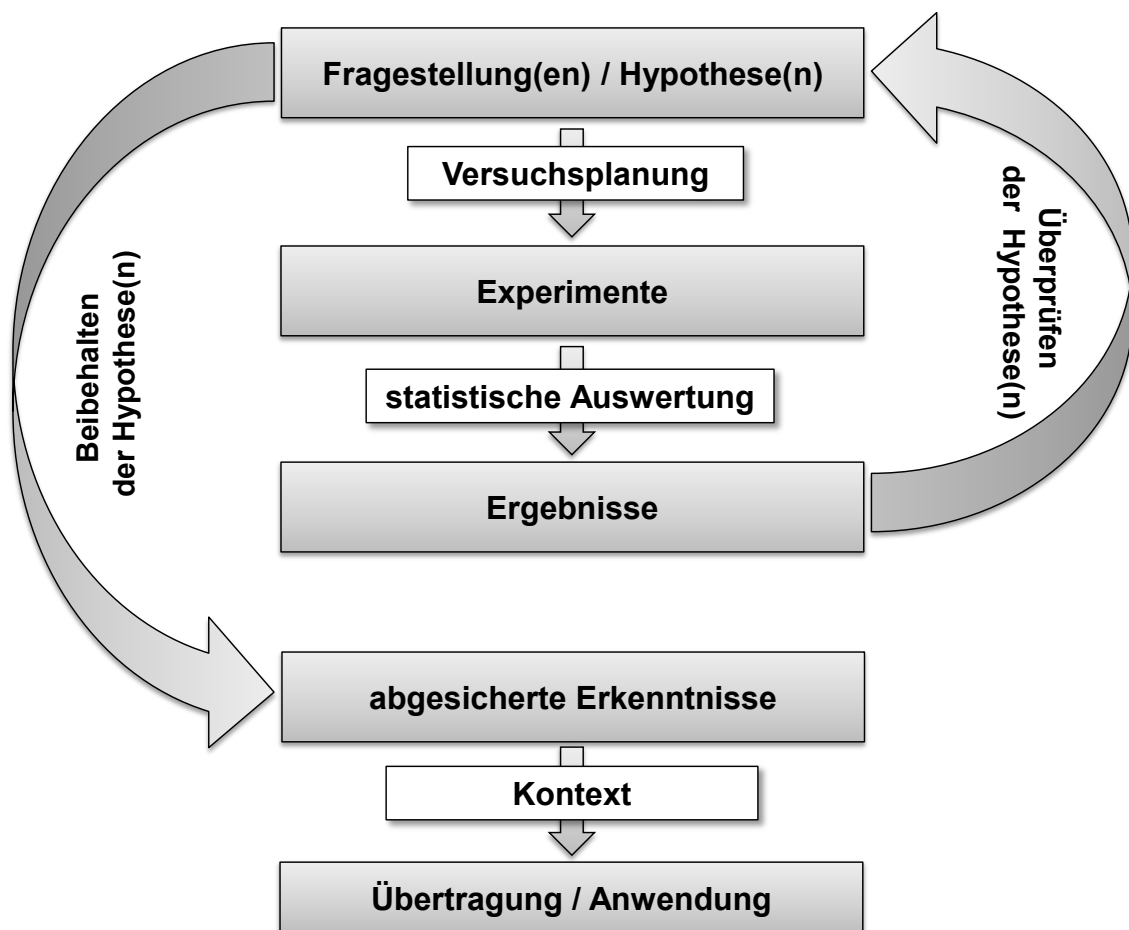


Abb. 2-1: Generelle Vorgehensweise bei wissenschaftlichen Arbeiten

In der Verhaltensbiologie steht zu Beginn einer Studie das Beschreiben eines beobachteten Verhaltens. Die Aufnahme von Verhalten ist an bestimmte Randbedingungen geknüpft. Die Beschreibung des Verhaltens muss dabei verifizierbar sein und darf nicht von subjektiven Einflüssen und Erwartungshaltungen beeinflusst werden. Daher ist es eine Grundvoraussetzung, auf objektive Beobachtungen zurückzugreifen, wie beispielsweise das Messen der Zeit bis zum Eintreten eines bestimmten Ereignisses oder das Aufnehmen der Größe eines Tieres. Subjektive Beschreibungen, wie z. B. „der Fisch ist schnell in den Bypass eingeschwommen“ oder von einem „großen

Lachssmolt<sup>5</sup> zu sprechen, sind Kategorien, die nicht verifizierbar und daher unzulässig sind. Auch eine Vermenschlichung bzw. Anthropomorphisierung von tierischen Verhaltensweisen, wie „der Fisch ist faul“ anstelle der Aussage „der Fisch ist nicht motiviert“ sind nicht zulässig; das Verhalten muss vor dem biologischen Hintergrund des beobachteten Tieres interpretiert werden. Dabei ist zwingend die ökologische Nische zu berücksichtigen, welche die Gesamtheit der Ansprüche eines Organismus an die abiotischen (chemische und physikalische Umweltfaktoren, z. B. Wassertemperatur) und biotischen Umweltfaktoren (z. B. Konkurrenz, Prädation) beschreibt (vgl. VANDERMEER 1972, OSCHKE 1972, SAUER et al. 1987, CAMPBELL & REECE 2003). Es ist damit von zentraler Bedeutung, die Datenaufnahme so zu planen, dass genau definierte Verhaltenskategorien aufgenommen werden, die a) zu reproduzierbaren, vom jeweiligen Beobachter unabhängigen Ergebnissen führen und b) bewertungsrelevant für den zu untersuchenden Parameter sind.

### **2.1.1 Vorüberlegungen bei der Planung verhaltensbiologischer Experimente**

#### Zeitlicher Aspekt

Die Arbeit mit lebenden Tieren ist oft mit einem hohen Zeitaufwand verbunden, da je nach Forschungsschwerpunkt bestimmte Randbedingungen erfüllt sein müssen. So ist beispielsweise die Untersuchung des Abstiegsverhaltens von Aalen im Freiland nur in einem relativ kleinen Zeitfenster von wenigen Wochen im Jahr möglich. Wird der zeitlich stark begrenzte Peak der Wanderung verpasst, besteht erst im darauffolgenden Jahr wieder die Möglichkeit zur Untersuchung. Dieses Beispiel veranschaulicht, dass eine vorausschauende Planung für die Datenaufnahme von übergeordneter Bedeutung ist.

#### Auswahl der Versuchstierart

Je nach Fragestellung besteht die Möglichkeit, domestizierte Tiere oder Nachzuchten von Wildtieren für die Untersuchungen zu verwenden. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass gezüchtete Tiere eventuell divergierende Verhaltensweisen im Vergleich mit ihren wildlebenden Artgenossen zeigen können. Hierbei sind Verhaltensdegenerationen wie beispielsweise eine Konditionierung auf Fütterung ebenso wie fehlende Umweltreize, z. B. Auslöser für Wanderungen oder die fehlende Fluchtreaktion vor einem Prädator zu nennen. Allerdings bietet die Verwendung von domestizierten Tieren bzw. Nachzuchten wildlebender Tiere auch Vorteile. So ist ihre Verfügbarkeit häufig nicht so stark begrenzt und der Zeitpunkt der Verwendung besser planbar als bei wildlebenden Tieren (NAGUIB 2006).

---

<sup>5</sup> Lachssmolts sind juvenile Lachse, die im Rahmen ihres Entwicklungszyklus vom Süßwasser in das Meer abwandern.

### Art der Untersuchung (Labor vs. Freiland)

Eine weitere Randbedingung, die während der Versuchsplanung berücksichtigt werden muss, ist, ob das Verhalten der gewählten Art in Labor- oder in Freilandexperimenten untersucht werden soll. Auch hier gibt es Vor- und Nachteile. Im Labor können eine Vielzahl von Parametern konstant gehalten und Störfaktoren weitestgehend ausgeschlossen werden. Dies ermöglicht die Erfassung der tatsächlichen Effekte des untersuchten Parameters bei festgelegten Rahmenbedingungen. In Freilandexperimenten hingegen haben viele verschiedene Faktoren, die teilweise nicht messbar sind, womöglich einen Einfluss auf das zu beobachtende Verhalten. Allerdings bieten Freilandexperimente folglich den Vorteil einer besseren Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf das *in situ* Verhalten der untersuchten Art. Im Gegensatz zu Laborbedingungen wird das Tier in seiner natürlichen Umgebung nicht einem möglichen Stress ausgesetzt. Der Idealfall wäre, wenn sich Laborexperimente und Freilanduntersuchungen ergänzen lassen (NAGUIB 2006).

### Anzahl benötigter Tiere (Stichprobengröße)

Bereits während der Versuchsplanung ist festzulegen, wie die aufgenommenen Daten später ausgewertet werden sollen. Dabei ist es wichtig, bereits im Vorfeld zu wissen, wie groß die Stichprobe der aufzunehmenden Daten sein soll. Die Aussagekraft eines Ergebnisses wächst dabei bis zu einem bestimmten Maß mit zunehmender Stichprobengröße. Insbesondere bei Laborexperimenten sind jedoch auch Aspekte wie die Verfügbarkeit sowie die Logistik der Tierhaltung und ethische Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Im Rahmen von genehmigungspflichtigen Tierversuchen wird daher die Ermittlung der genauen Anzahl an benötigten Versuchstieren gefordert (vgl. § 31 Abs. 1, Satz 2 Nr. 1c TierSchVersV). Es sind höchstens so viele Tiere zu verwenden, wie es sich aus wissenschaftlicher Sicht auch begründen lässt. Die Untersuchung verschiedener Individuen ist allerdings unabdingbar, um mögliche Artefakte zu minimieren. Wird ein Verhalten lediglich an einem Individuum untersucht, kann nicht davon ausgegangen werden, dass das beobachtete Verhalten repräsentativ für die Population oder Art ist.

## **2.1.2 Methoden der Datenerfassung**

Je nach Fragestellung können in verhaltensbiologischen Studien Individuen oder Gruppen beobachtet werden. Im Falle einer individuellen Beobachtung muss, je nach Tierart, auf Hilfsmittel zurückgegriffen werden, um die Individuen voneinander zu unterscheiden. Ist eine Unterscheidung anhand natürlicher Merkmale (z. B. Fellfarbe, Flukengeometrie bzw. -zeichnung) nicht möglich, kann auf verschiedene Markierungsmethoden zurückgegriffen werden. Diese Methoden sind vielfältig und erstrecken sich von einfachen Farbmarkierungen über Zahlencodierungen in Form von Ringen oder Ohrmarken bis hin zu Funksendern. Die Markierung darf sich dabei nicht auf das Verhalten des Tieres auswirken; das Tier darf durch die Markierung nicht behindert bzw. die Datenaufnahme nicht durch Verhaltensartefakte überformt werden (NAGUIB 2006).

Zur Beobachtung des Verhaltens von Tieren im Freiland oder unter standardisierten Bedingungen im Labor gibt es vielfältige Möglichkeiten der Datenaufnahme. Bei der direkten Beobachtung ist der Einfluss des Beobachters zu berücksichtigen, so dass ein Einfluss auf das beobachtete Verhalten minimiert wird. Dies kann mit verschiedenen Hilfsmitteln realisiert werden, wie dem Einsatz verspiegelter Glasscheiben, dem Bau von Beobachtungsständen (vgl. Abb. 2-2) sowie der Aufnahme des Verhaltens mittels Kameras oder Ferngläsern im Freiland (NAGUIB 2006).

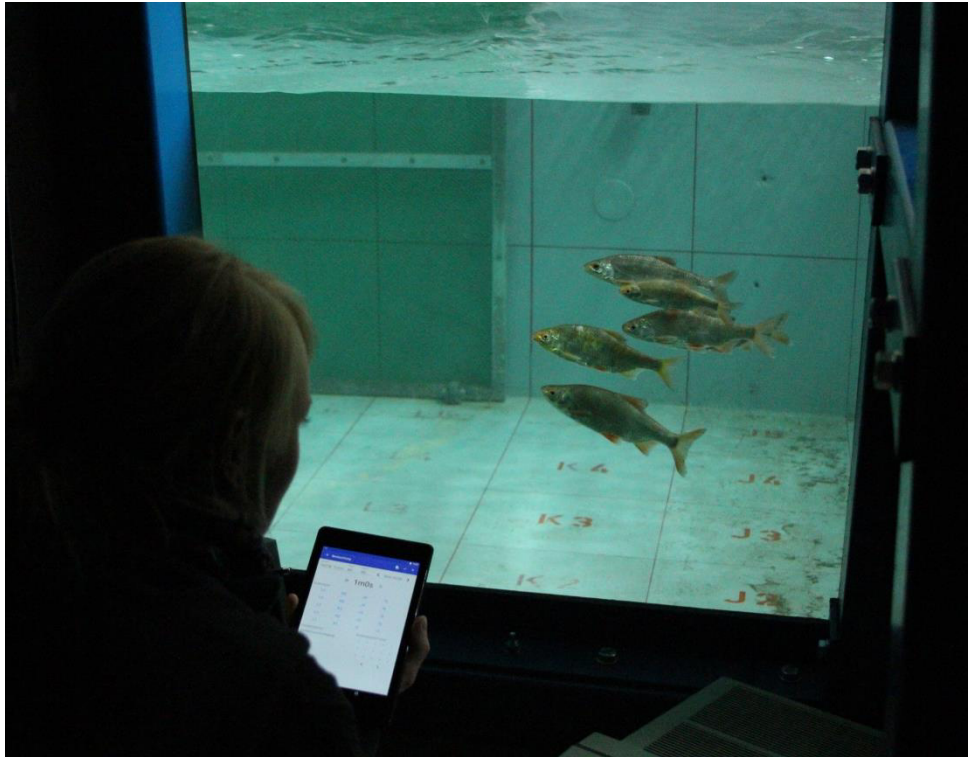


Abb. 2-2: Verhaltensbeobachtung von Fischen in einer ethohydraulischen Versuchsrinne

Neben der direkten Beobachtung einzelner Tiere oder Tiergruppen spielen technische Hilfsmittel eine wichtige Rolle. Technische Hilfsmittel wie z. B. Videokameras haben gegenüber der direkten Beobachtung den Vorteil, dass die Verhaltensweisen und Daten differenzierter und objektiv aufgenommen werden können. Das Material kann archiviert werden und im Nachhinein erneut analysiert werden. Wobei es Grundvoraussetzung ist, dass sich die Auswertungen immer auf die zuvor aufgestellte Fragestellung beziehen muss. Mit Hochgeschwindigkeitskameras können schnelle Bewegungen (z. B. der Flossenschlag von Fischen) aufgenommen werden und später bei verlangsamer Wiedergabe quantitativ ausgewertet werden. Eine weitere Methode, die in letzter Zeit an Bedeutung zugenommen hat, ist die automatische Registrierung von Beobachtungen.

Der Einsatz von Video- oder Audioaufzeichnung kann den Vorteil bieten, dass das Verhalten von Tieren über einen längeren Zeitraum beobachtet werden kann, ohne dass die beobachteten Tiere in ihrem Verhalten durch einen wahrnehmbaren Beobachter beeinflusst werden. Durch die Standardisierung der Aufnahme wird die Auswertung nicht durch subjektive Einschätzungen von verschiedenen Personen beeinflusst und kann replizierbar registriert werden (NAGUIB 2006). Natürlich sei zu

erwähnen, dass eine nachträgliche Auswertung von Videomaterialien viel Zeit in Anspruch nimmt. Dies kann durch eine automatisierte Registrierung minimiert werden, indem die Videokamera nur aufzeichnet, wenn tatsächlich Bewegungen in ihrem Aufnahmeradius registriert werden.

Spezifische Hilfsmittel für fischökologische Untersuchungen werden in Kapitel 2.2.2 näher erläutert.

### 2.1.3 Datenaufnahme

Generell muss bei der Versuchsplanung die Frage geklärt werden, welche Daten aufgenommen werden müssen, um die zuvor aufgestellte Hypothese überprüfen zu können. Da die zeitlichen (s.o.) und personellen Ressourcen während eines Verhaltensexperiments immer begrenzt sind, muss die Datenaufnahme mit größtmöglicher Effizienz ablaufen. Dabei kann eine zu detaillierte Aufnahme eines bestimmten Parameters (z. B. genaue Körperlänge anstelle von Körperlängenklassen) dazu führen, dass redundante Daten produziert werden und gleichzeitig keine Kapazitäten mehr für andere, ebenfalls wichtige Messgrößen vorhanden sind. Beispielsweise können (je nach Fragestellung) bei der Größenbestimmung an vielen Individuen Körperlängen-Klassen anstelle von exakt gemessenen Körperlängen erfasst werden.

Parallel zur Frage, welche Daten im Rahmen der Experimente aufgenommen werden sollen, steht die Planung von Datenaufnahmeprotokollen. Hierbei ist die Kommunikation mit allen an den Versuchen beteiligten Personen notwendig, um das Protokoll unter einer möglichst vollständigen Berücksichtigung der relevanten Aspekte entwickeln zu können.

Nachdem die Fragestellungen formuliert wurden und festgelegt wurde, welche Daten zur Beantwortung der Fragen mit welchen Methoden erhoben werden, schließt sich die Planung der Datenaufnahme an. Hierbei gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Möglichkeiten, Daten aufzunehmen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

#### 2.1.3.1 Qualitative Datenaufnahme

Die Aufnahme von Daten in qualitativer Form ist für Vorversuche von besonderer Bedeutung, da sich hier die Möglichkeit bietet, Methoden zu testen und den jeweiligen Ansprüchen anzupassen. Weiter kann eine Kategorisierung bewertungsrelevanter messbarer Verhaltensweisen vorgenommen werden. Mithilfe von Ethogrammen<sup>6</sup> kann so zunächst ein Register des „Verhaltensrepertoires“ der zu testenden Tierart erstellt werden.

Im Falle von *ad libitum* Protokollen (aus dem Lateinischen, Bedeutung = nach Belieben) werden die Ereignisse nicht quantitativ notiert; derartige Protokolle erfassen

---

<sup>6</sup> schriftliches oder graphisches Verzeichnis klar definierter Verhaltensweisen einer Tierart, Beispiel Fisch: Orientierungsverhalten: positive Rheotaxis, negative Rheotaxis, Verharren

Verhaltensweisen oder seltene Ereignisse und können damit die quantitativen Aufnahmen ergänzen (NAGUIB 2006).

Bei qualitativen Daten ist zu beachten, dass diese eher einen ergänzenden Charakter haben und daher nur bedingt interpretierbar sind. Es besteht die Gefahr, dass falsche Rückschlüsse gezogen und unzulässige Verallgemeinerungen getroffen werden. Eventuell sind registrierte Verhaltensweisen nur die Antwort auf ein Artefakt oder nicht repräsentativ für die jeweilige Art. Daher ist es bei der Auswertung qualitativer Daten von besonderer Bedeutung, dass diese mittels Expertenwissen interpretiert und in den ökologischen Kontext der beobachteten Tierart gestellt werden.

Expertenwissen ist dann vorhanden, wenn die Experimentatoren auf der Grundlage des Studiums der Lebensweise des Versuchstieres und seines Lebensraums in der Lage sind, das beobachtete Verhalten in Bezug auf die arttypische Relevanz zu bewerten. Es muss eine Ableitung erfolgen, wie das beobachtete Verhalten im Versuch operationalisierbar ist, um die Reaktion auf den zu untersuchenden Modellparameter zu gewährleisten. Das heißt, es muss eine Qualitätskontrolle stattfinden, die es ermöglicht, Aussagen darüber zu treffen, ob das beobachtete Verhalten überhaupt bewertungsrelevant ist.

Insbesondere für Vorstudien sind qualitative Datenaufnahmen von Bedeutung. Diese ermöglichen es, relevante Verhaltensweisen aus den Beobachtungen zu eruieren, die wichtig für eine Bewertung des zu untersuchenden Setups sind. Gezeigte Verhaltensweisen, die nicht zur Beantwortung der Fragestellung beitragen, sind in den späteren Hauptversuchen nicht weiter zu berücksichtigen.

Als Beispiel einer nicht bewertungsrelevanten Verhaltensweise kann hier die aufgrund eines Reizes (Anflug eines Insekts auf Wasseroberfläche in Versuchsrinne) induzierte Aufnahme von Nahrung bei Fischen während eines ethohydraulischen Versuchs genannt werden.

### **2.1.3.2 Quantitative Datenaufnahme**

Die Grundlage verhaltensbiologischer Studien bilden quantitative Daten, die durch *ad libitum* Beobachtungen ergänzt, allerdings nicht ersetzt werden können (NAGUIB 2006).

Bei quantitativen Daten handelt es sich um zählbare Ereignisse, die aus der Interaktion mit dem zu untersuchenden Parameter bzw. der zu untersuchenden Struktur resultieren und in einem späteren Schritt statistisch ausgewertet werden (vgl. Kap. 2.1.4). Die Datenaufnahmestruktur muss dabei im Vorfeld der Hauptversuche festgelegt sein und an die Wahl der statistischen Methode angepasst sein.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Ereignisse quantitativ zu erfassen. Hierbei seien Häufigkeiten oder bestimmte Frequenzen, in denen ein bestimmtes Verhalten beobachtet wird, genannt (vgl. MARTIN & BATESON 2007). Es können beispielsweise Verhaltensweisen kategorisiert werden (z. B.: Schwimmt ein Fisch vorwärts oder rückwärts an einen Rechen an?). Es können aber auch Zeitmessungen, wie z. B. die Dauer einer bestimmten Verhaltensweise oder wann diese ausgelöst wird, mit aufgenommen

werden. Messbar ist auch die Zeit bis zum Eintreten eines bestimmten Ereignisses, wie beispielsweise das Einschwimmen eines Fisches in einen Bypass. Auch ist die Aufnahme von binären Daten möglich, bei der das generelle Verhalten von Probanden aufgenommen wird (z. B.: Der Fisch schwimmt in den Bypass oder er schwimmt nicht in den Bypass). Diese Daten können dann z. B. in Form von Häufigkeiten vergleichend ausgewertet werden (vgl. Abb. 2-3).

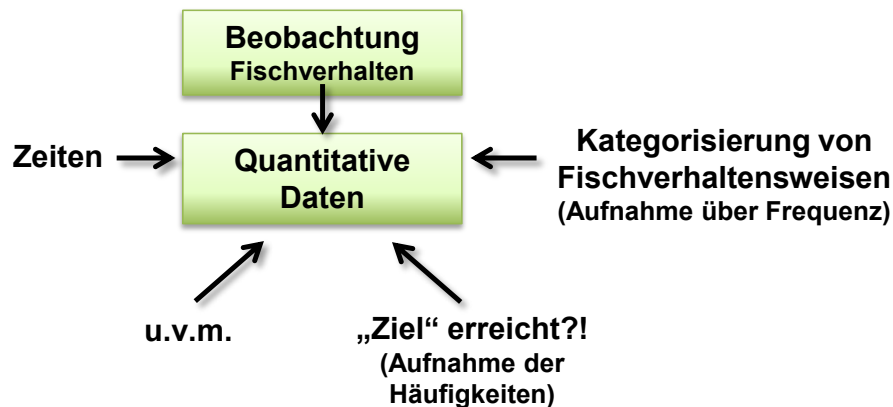


Abb. 2-3: Verschiedene Möglichkeiten zur Aufnahme quantitativer Daten

## 2.1.4 Statistische Datenauswertung

Die statistische Datenauswertung untergliedert sich in die beschreibende (deskriptive) und die schließende (induktive) Statistik, deren Grundlagen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

### 2.1.4.1 Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik dient in erster Linie dazu, sich einen Überblick über die Daten bzw. deren Verteilungen zu verschaffen. Dies kann beispielsweise in Form von Tabellen oder Diagrammen geschehen. Damit können zunächst Tendenzen der Ergebnisse dargestellt werden, die nachfolgend mittels der schließenden Statistik auf Signifikanz überprüft werden müssen. Die deskriptive Statistik dient ferner dazu, die Ergebnisse der schließenden Statistik zu interpretieren. Da sie aufeinander aufbauen, ist es von Bedeutung, beide statistische Auswertungswege zu berücksichtigen (MARTIN & BATESON 2007).

In verhaltensbiologischen Studien gibt es in Abhängigkeit von der Fragestellung und Erfassungsmethodik viele verschiedene Möglichkeiten, welche Daten aufgenommen werden. Ebenso gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie diese Daten letztendlich ausgewertet werden sollen. Die Auswertungsmethodik ist dabei nicht nur von der Fragestellung, sondern auch von der jeweiligen Verteilung der Daten abhängig.

Eine Möglichkeit, sich einen ersten Überblick über die aufgenommenen Daten zu verschaffen, bietet das Histogramm. Das Histogramm stellt die Häufigkeitsverteilung von aufgenommenen Beobachtungen bzw. Ereignissen in verschiedenen Klassen auf einen Blick übersichtlich in Form eines Balkendiagramms dar.



Abb. 2-4 zeigt das Ergebnis einer Elektrofischung in Form eines Histogramms, das die Fischkörperlängen in verschiedene Klassen einteilt.

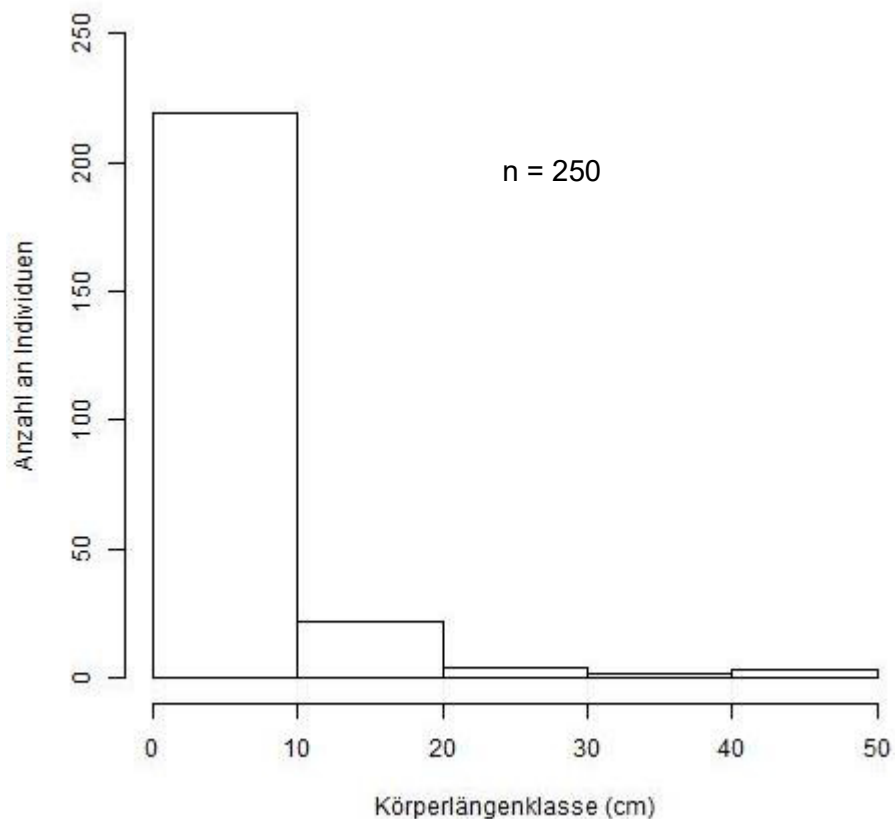


Abb. 2-4: Histogramm der Befischungsergebnisse einer Elektrofischung eines Fließgewässers im Tiefland, dargestellt sind die Körperlängen der nachgewiesenen Fische in verschiedenen Klassen,  $n$  = Anzahl nachgewiesener Fische (Datengrundlage: BUGEFi, unveröffentlichte Daten)

Abb. 2-4 zeigt die Anzahl an nachgewiesenen Fischen ( $n$ ) und die Zugehörigkeit ihrer Körpergröße zu einer bestimmten Klasse („0-10 cm“, „11-20 cm“ usw.). Die Angabe des Stichprobenumfangs ( $n$ ) ist für die deskriptive Statistik insofern von Bedeutung, als dass durch sie ein Überblick über die dargestellten Daten erlangt wird. Insbesondere bei Darstellungen relativer Werte ist die Kenntnis der absoluten Größe der Stichprobe bewertungsrelevant und muss aufgeführt werden, ansonsten besteht - insbesondere bei kleinen Stichproben - die Gefahr, falsche Rückschlüsse aus den Ergebnissen zu ziehen.

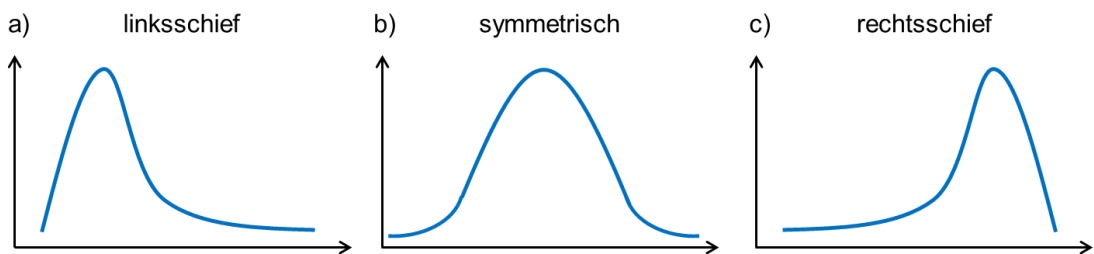
Im aufgeführten Beispiel sind die Fische in fünf Körperlängenklassen eingeteilt, denen jeweils die entsprechende Anzahl an Fischen zugeordnet wurde (vgl. Abb. 2-4). Es zeigt sich, dass bei der Befischung größtenteils kleine Fische nachgewiesen wurden. So wird der Großteil der Fische der kleinsten Körperlängenskategorie (0 bis 10 cm) zugeordnet, während vergleichsweise nur wenige Fische den anderen Körperlängenklassen angehören. Zwar lassen diese Erkenntnisse aus verhaltensbiologischer Sicht keinen Wissenszuwachs erwarten, jedoch können anhand der Abbildung Rückschlüsse

auf die Verteilung der Daten gezogen werden. So liegt in diesem Falle keine Normalverteilung, sondern eine linksschiefe Verteilung der Daten vor (vgl. Abb. 2-5a).

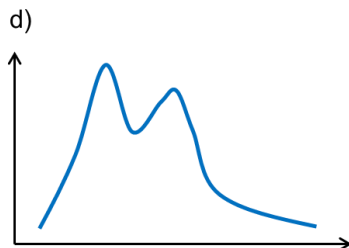
**Die Analyse der Datenverteilung mittels deskriptiver Statistik ist eine Grundvoraussetzung für die Auswahl des jeweils passenden Tests im Rahmen der schließenden Statistik.**

Mittels eines Histogramms (vgl. Abb. 2-4) kann die Verteilung der Daten übersichtlich dargestellt werden. Abb. 2-5 zeigt einen schematischen Überblick über verschiedene Datenverteilungen. Im Falle der unimodalen Verteilungen (nur ein Gipfel) gibt es links-schiefe sowie rechtsschiefe und symmetrische Verteilungen. Bei der symmetrischen Datenverteilung, auch Glockenkurve genannt, liegt eine Normalverteilung der Daten vor. Darüber hinaus gibt es bimodale (zweigipfelige) und multimodale (mehrgipfelige) Verteilungen.

#### Unimodale Datenverteilungen



#### Bimodale Datenverteilungen



#### Multimodale Datenverteilungen

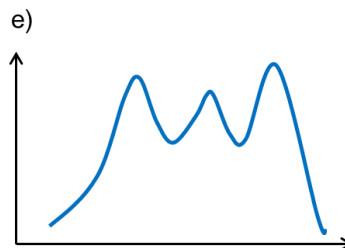


Abb. 2-5: Schematischer Überblick über verschiedene Datenverteilungen

Welches Maß die jeweiligen Daten am besten darstellt, richtet sich neben der Fragestellung ebenfalls nach der Verteilung der Daten. Als gängige Maße sind die sogenannten zentralen Lageparameter, hierzu zählen Mittelwerte (arithmetisches Mittel, Median) sowie die dazugehörigen Streuungsmaße (Standardabweichung, Varianz etc.), zu nennen. Diese können in Tabellen und Diagrammen dargestellt werden und dienen für die spätere Auswertung der Daten mittels schließender Statistik als Grundlage.

Der **Mittelwert** für symmetrisch verteilte Daten, die einer sogenannten Normalverteilung entsprechen, ist das arithmetische Mittel. Das arithmetische Mittel berechnet sich aus dem Quotient der Summe aller Werte durch die Anzahl der Werte (s. Formel (1)).

$$\bar{x}_{arithm} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

[ $\bar{x}_{arithm}$ : arithmetisches Mittel, x: reelle Zahlen, z. B. Messwerte,  
n: Stichprobenumfang]

In verhaltensbiologischen Untersuchungen unterliegen die Daten aufgrund ihrer Variabilität häufig keiner Normalverteilung (MARTIN & BATESON 2007). Als Beispiel dafür, dass das arithmetische Mittel im Falle nicht normalverteilter Daten die Interpretation von Ergebnissen verfälschen kann, soll hier die Aufenthaltszeit von Aalen in einem Evakuierungssystem einer Wasserkraftanlage, das Jung- und Kleinfische aus dem Bereich zwischen dem Rechen und dem Turbinenleitapparat leiten soll, dienen (vgl. Anhang A.1). Die mittlere Aufenthaltsdauer der getesteten Aale lag bei 1 Minute und 44 Sekunden. Bewertet man die Daten im Detail, fällt ein Ereignis auf, bei dem sich ein Aal über einen Zeitraum von knapp 839 Sekunden (ca. 14 Minuten) in dem Evakuierungssystem aufgehalten hat (vgl. Tab. 2-1). Ohne diesen Ausreißerwert würde der Mittelwert bei lediglich 12 Sekunden liegen. Dementsprechend scheint das arithmetische Mittel kein robustes Maß zur Darstellung dieser Daten zu sein.

Tab. 2-1: Überblick über die Aufenthaltsdauer von Aalen in einem Evakuierungssystem mit Beispiel-Berechnung des arithmetischen Mittels

Aufenthaltsdauer (s)	Beispiel-Berechnung arithmetisches Mittel nach Formel (1):
6	$\bar{x}_{arithm} = \frac{6 + 839 + 16 + 6 + 20 + 34 + 12 + 3 + 2}{9}$ $= \frac{938}{9} = 104,22 \text{ s} = 1 \text{ Min } 44 \text{ s}$
839	
16	
6	
20	
34	
12	
3	
2	

Ein robusteres Lagemaß, das auch für schiefe Verteilungen angewendet werden kann, ist der **Median**. Extreme Werte bzw. Ausreißer haben bei der Berechnung des Medians eine geringere Gewichtung als bei der Berechnung des arithmetischen Mittels.

Bei ungerader Anzahl an Daten ist der Median der mittlere Wert der nach ihrer Größe geordneten Daten. Bei gerader Anzahl der Daten wird aus den beiden mittleren Werten zumeist das arithmetische Mittel gebildet (s. Formel (2)).

$$\bar{x}_{med} = \begin{cases} x_{(\frac{n+1}{2})} & n \text{ ungerade} \\ \frac{1}{2} (x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}) & n \text{ gerade} \end{cases} \quad (2)$$

$[\bar{x}_{med}$ : Median, x: Messwert, n: Stichprobenumfang]

Im aufgeführten Beispiel läge der Median demnach bei einer Aufenthaltsdauer von 12 Sekunden, dieser Wert wäre für die mittlere Aufenthaltsdauer aussagekräftiger als das arithmetische Mittel.

Tab. 2-2: Überblick über die Aufenthaltsdauer von Aalen (Werte der Größe nach absteigend sortiert) in einem Evakuierungssystem mit Beispiel-Berechnung des Medians

Rang (Nr.)	Aufenthaltsdauer (s)	Beispiel-Berechnung Median nach Formel (2):  $\bar{x}_{med} = x_{(\frac{9+1}{2})} = x_{(5)} = 12 \text{ s}$
1	2	
2	3	
3	6	
4	6	
5	12	
6	16	
7	20	
8	34	
9	839	

Da aber extreme Werte nicht einfach unberücksichtigt bleiben dürfen, weil sie Teil des Ergebnisses sind, müssen die zentralen Lagemaße stets mit den entsprechenden Streuungsmaßen dargestellt werden. Im Falle des arithmetischen Mittels wird als Streuungsmaß die sogenannte **Standardabweichung** angegeben. Die Standardabweichung berechnet sich aus der Differenz der Einzelwerte des jeweiligen Mittelwertes. Wie oben beschrieben, eignet sich das arithmetische Mittel mit der Standardabweichung am besten für Daten, die einer Normalverteilung unterliegen. Für „schiefe“ Verteilungen hingegen ist der Median mit den dazugehörigen Quartilen ein

aussagekräftiges Maß. Zur Darstellung wird für gewöhnlich ein Boxplot (Abb. 2-6) verwendet.

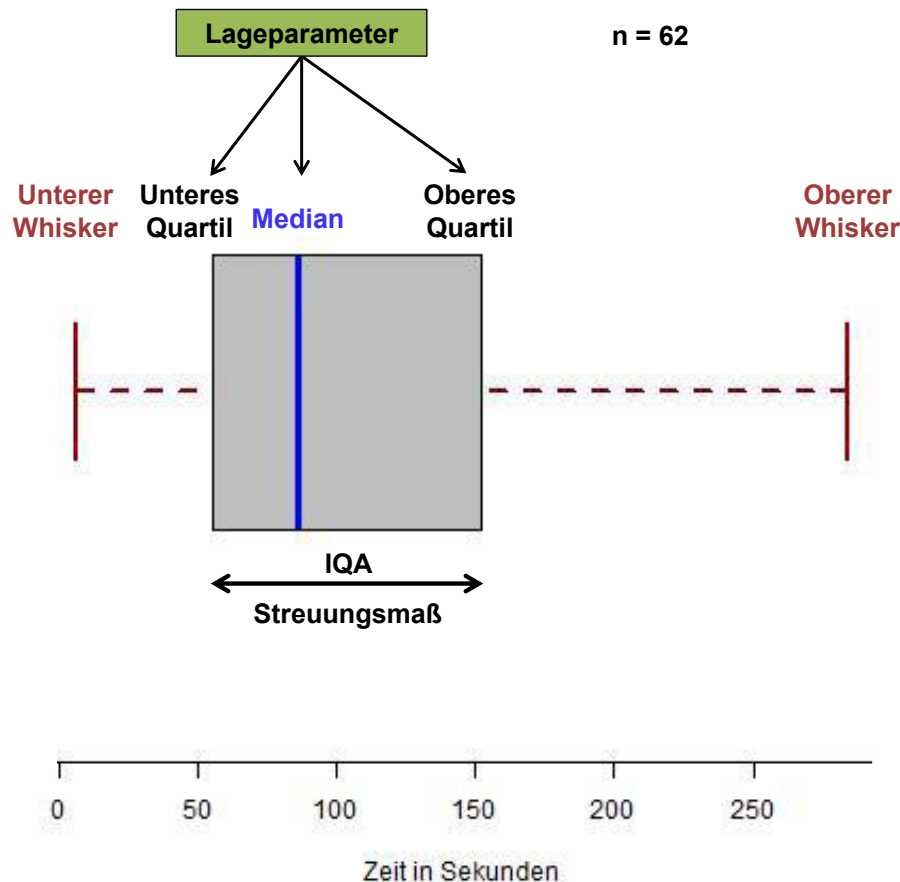


Abb. 2-6: Zeit in Sekunden bis zum Erreichen der Ziellinie für Lachssmolts mit detaillierter Erklärung der Komponenten eines Boxplots, IQA = Interquartilsabstand,  $n$  = Anzahl getesteter Lachssmolts

Der Median befindet sich in der Box (blaue Linie) und gibt den mittleren Wert der Daten an (s. Formel (2)). Die Box beinhaltet 25 % der Werte ober- und unterhalb des Medians. In der Box liegen damit die mittleren 50 % aller Werte. Die Box wird durch das obere und untere Quartil begrenzt und gibt ein Streuungsmaß, auch Interquartilsabstand (IQA) genannt, an (BÄRLOCHER 1999). Der obere und untere Whisker gibt die Spanne der außerhalb der Box liegenden Daten an. In der Regel ist die Länge der Whisker auf die 1,5-fache Länge des Interquartilsabstandes begrenzt, so dass bei dieser Form der Abbildung die extremen Ausreißer nicht berücksichtigt werden.

Um in einem Boxplot auch die Ausreißer zu erfassen, können diese in Form von einzelnen Punkten dargestellt werden (Abb. 2-7a). Darüber hinaus können die Whisker so eingestellt werden, dass diese die gesamten Werte abbilden (Abb. 2-7b). Dies kann bei Untersuchungen mit vielen extremen Werten jedoch zu einer gewissen Unübersichtlichkeit führen, so dass die Box mit dem Median nicht mehr gut zu erkennen ist.

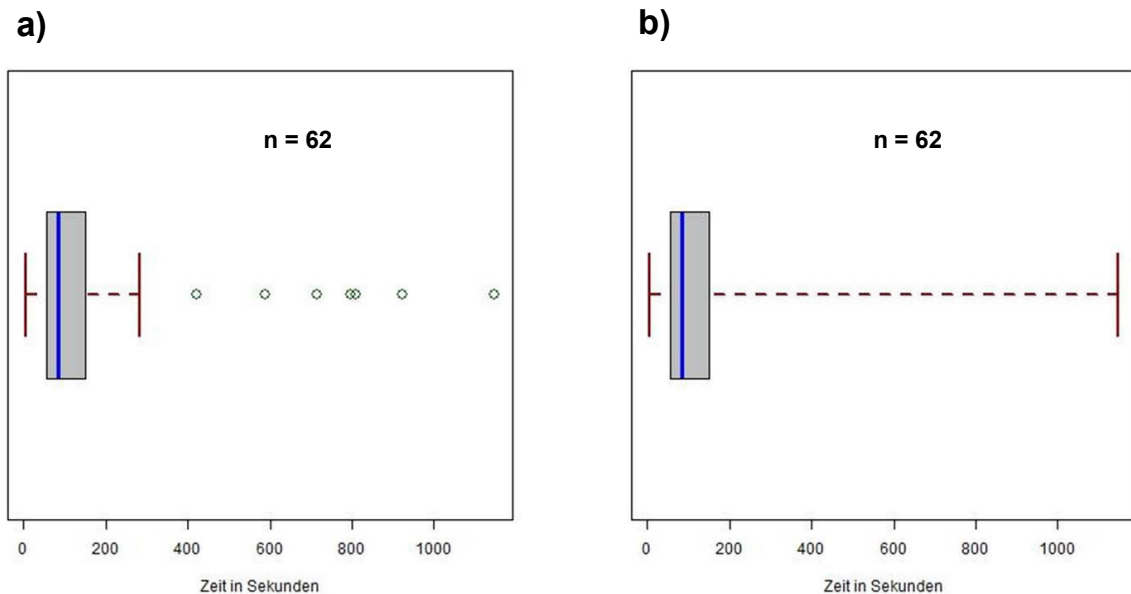


Abb. 2-7: Boxplots mit der a) Darstellung von Ausreißern sowie als b) Darstellung mit Minimal- und Maximalwerten der Zeit in Sekunden bis zum Erreichen einer Startlinie von Lachssmolts in einer ethohydraulischen Untersuchung,  $n$  = Anzahl getesteter Lachssmolts

Abb. 2-6 zeigt, dass die mittlere Zeit der Lachssmolts bis zum Erreichen einer zuvor definierten Linie in einem ethohydraulischen Versuchsstand im Mittel bei ca. 80 bis 90 Sekunden lag und für 50 % der Tiere etwa zwischen 50 und 150 Sekunden.

Auch die Verteilung der Daten kann anhand der Lage des Medians in der Box bestimmt werden. Im Beispiel oben liegt eine linksschiefe Verteilung der Daten vor (vgl. Abb. 2-5a). Bei einer Normalverteilung (vgl. Abb. 2-5b) würde der Median genau in der Mitte der Box liegen, dementsprechend würde der Median mit dem arithmetischen Mittel übereinstimmen.

Im Rahmen der deskriptiven Statistik lassen sich mithilfe der Korrelation verschiedener Variablen Zusammenhänge graphisch darstellen. Ein Beispiel dazu wird in Abb. 2-8 aufgeführt. Die dargestellte Korrelation gibt einen deutlichen Hinweis darauf, dass der Abfluss ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) des vorliegenden Gewässers stark mit dem Pegelstand (cm) korreliert ist. Das heißt mit zunehmendem Abfluss steigt auch der Pegel des Gewässers an. Eine Korrelation kann jedoch nur Vermutungen zulassen, ob dieser Zusammenhang auch signifikant ist, kann nur mithilfe der schließenden Statistik nachgewiesen werden.

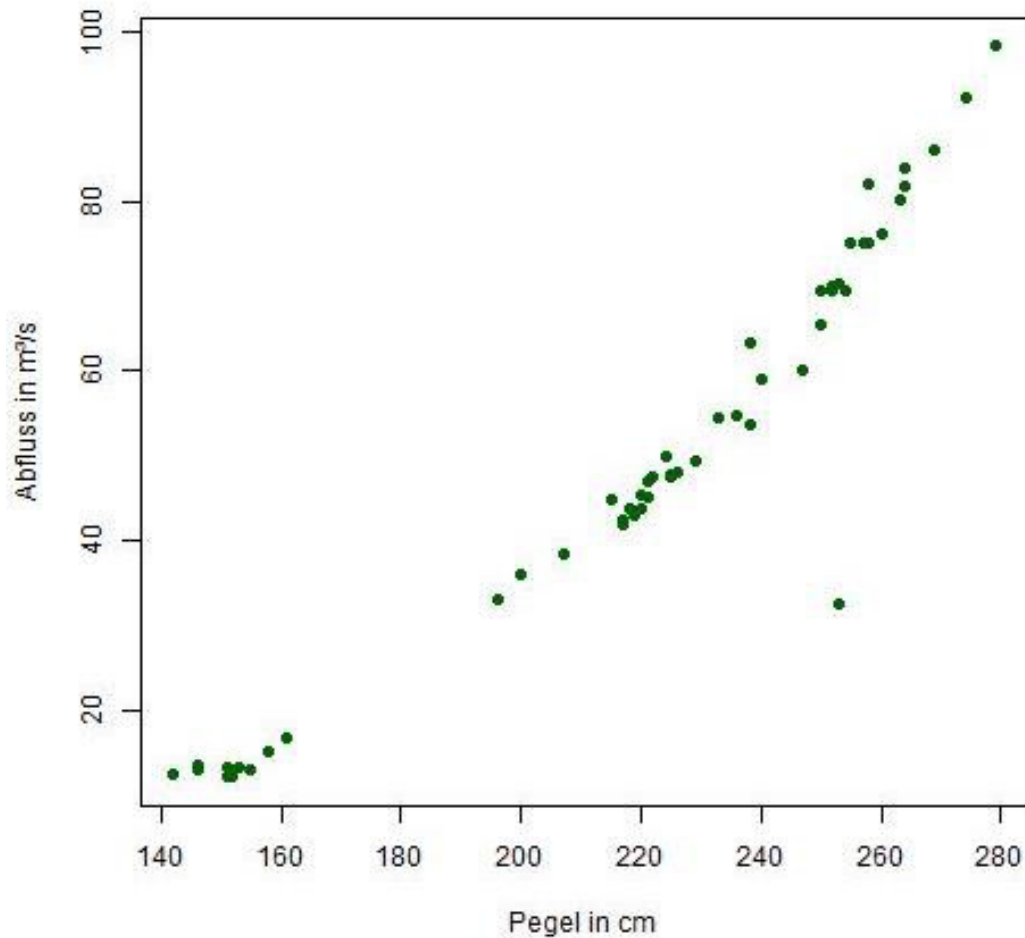


Abb. 2-8: Korrelation des Abflusses in m³/s und dem Pegel in cm eines Beispiel-Gewässers

Anhand ihrer graphischen Darstellung kann ein erster Überblick über die Daten und deren Verteilung gewonnen werden. Die deskriptiven Ergebnisse lassen für sich genommen wissenschaftliche Aussagen jedoch nur in begrenztem Maße zu. Die entsprechenden Lageparameter und Streuungsmaße dienen aber zum einen als Grundlage für die schließende Statistik und zum anderen zur Visualisierung und Interpretation der Ergebnisse.

### 2.1.4.2 Schließende Statistik

Die schließende Statistik ermöglicht die Interpretation bzw. Analyse von Versuchsergebnissen frei von subjektiver Wahrnehmung. Soll beispielsweise der Einfluss eines Parameters auf das Verhalten von Fischen untersucht werden, muss ausgeschlossen werden, dass mögliche Unterschiede in den aufgenommenen Daten zufällig bedingt sind oder von anderen Parametern als dem tatsächlich untersuchten Parameter hervorgerufen werden.

Grundlage für die statistische Auswertung sind die Lageparameter und Streuungsmaße der deskriptiven Statistik sowie die entsprechenden Datenverteilungen (Kap. 2.1.4.1).

Im Rahmen von Versuchen können häufig nur relativ kleine Stichproben (etwa eine begrenzte Anzahl an Fischen) getestet werden. Die Stichprobe muss dabei so gewählt werden, dass sie für die Grundgesamtheit (Fischpopulation, Fischart) repräsentativ ist (z. B. verschiedene Körperklassen, Altersstadien). Nur dann sind Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit zulässig.

Mithilfe der schließenden Statistik kann überprüft werden, ob sich ein bestimmtes beobachtetes Verhalten bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen (z. B. zwei verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten) tatsächlich aufgrund dieses Parameters unterscheidet oder nicht. Kann bei den Beobachtungen ein zufälliger Zusammenhang ausgeschlossen werden, ist ein signifikanter Unterschied<sup>7</sup> zwischen den Verhaltensweisen infolge der getesteten Bedingungen und damit ein Einfluss des getesteten Parameters auf das Verhalten nachgewiesen. Das Ergebnis kann im Fall einer repräsentativen Stichprobe dann auf die Grundgesamtheit (z. B. eine Fischart, Population, Fische einer bestimmten Körperlängenklasse) übertragen werden.

Grundlage bildet stets eine zu prüfende Hypothese, beispielsweise, dass es bei einem Versuch Unterschiede im Verhalten von Fischen in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit gibt ( $H_1$ ). Im Gegensatz dazu steht die Nullhypothese ( $H_0$ ), die besagt, dass es keine Unterschiede in Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen gibt (Tab. 2-3). Im Rahmen von schließenden statistischen Tests werden die Daten gegen die Nullhypothese getestet. Bei Ablehnen der Nullhypothese wird automatisch die zuvor postulierte Alternativhypothese ( $H_1$ ) angenommen.

#### **Statistischer Test (Hypothesentest)**

*Im statistischen Test wird eine zuvor aufgestellte Nullhypothese (kein Einfluss eines Parameters bzw. kein Unterschied zwischen Gruppen) anhand zuvor aufgenommener Versuchsdaten mittels mathematischer Testverfahren auf ihre Gültigkeit überprüft. Wird die Nullhypothese ( $H_0$ ) verworfen, wird die Alternativhypothese ( $H_1$ ) angenommen.*

---

<sup>7</sup> Statistische Signifikanz bedeutet, dass die erkannte Abhängigkeit zu groß ist, um noch als zufällig gelten zu können.



Tab. 2-3: Überblick über die verschiedenen Begrifflichkeiten beim Hypothesentest mit Beispielen

Hypothese	Beschreibung	Beispiel
Nullhypothese $H_0$	Kein Unterschied zwischen den Stichproben oder: Stichproben unterscheiden sich nicht.	Es gibt <b>keinen</b> signifikanten Unterschied im Verhalten der Fische zwischen zwei getesteten Strömungsgeschwindigkeiten im Bypasseingang.
Alternativhypothese $H_1$	Unterschied zwischen den Stichproben oder: Stichproben unterscheiden sich.	Es gibt <b>einen</b> signifikanten Unterschied im Verhalten der Fische zwischen zwei getesteten Strömungsgeschwindigkeiten im Bypasseingang.

Bei der Entscheidung im Rahmen des statistischen Tests, ob die Null- bzw. Alternativhypothese angenommen oder abgelehnt werden soll, können zwei verschiedene Fehler auftreten: der  **$\alpha$ -Fehler** und der  **$\beta$ -Fehler**.

Die Irrtumswahrscheinlichkeit, auch Signifikanzniveau  $p$  oder  **$\alpha$ -Fehler** genannt, gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Nullhypothese **fälschlicherweise verworfen** wird, obwohl sie in Wirklichkeit korrekt ist. Die Irrtumswahrscheinlichkeit ist in der Regel auf 5 % ( $p \leq 0,05$ ) festgelegt. Dies bedeutet, dass in fünf von 100 Fällen ein Irrtum vorliegen kann. Die Wahrscheinlichkeit kann aber auch mit  $p \leq 0,01$  bzw.  $p \leq 0,001$  gewählt werden, womit ein strengeres Signifikanzniveau vorliegt. Bei der Darstellung von Ergebnissen ist stets das Signifikanzniveau anzugeben ( $p \leq 0,05$  bzw.  $0,01$  bzw.  $0,001$ ). Konnten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden, ist auch diese Information mittels des Kürzels „n. s.“ – „**nicht signifikant**“ anzugeben. Die jeweilige Vertrauenswahrscheinlichkeit wird mit  $1-\alpha$  berechnet. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 % ( $p \leq 0,01$ ) gilt demnach, dass die Nullhypothese ( $H_0$ ) mit 99-prozentiger Wahrscheinlichkeit korrekt ist.

Der  **$\beta$ -Fehler** gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Nullhypothese **fälschlicherweise angenommen** wird, obwohl die Alternativhypothese korrekt ist. Die Berechnung dieser Wahrscheinlichkeit ist im Gegensatz zur Festlegung des  $\alpha$ -Fehlers nicht möglich, da der „wahre Wert“ des Ergebnisses bereits im Vorfeld feststehen müsste (STAHEL 2002, DIETMAIER 2014, KRICKHAHN & POSS 2016). Verringert werden kann der  $\beta$ -Fehler durch das Erhöhen der Irrtumswahrscheinlichkeit bzw. des Signifikanzniveaus oder durch das Erhöhen des Stichprobenumfangs.

Tab. 2-4 zeigt die verschiedenen Entscheidungsmöglichkeiten beim Hypothesentest.

Tab. 2-4: Verschiedene Entscheidungsvarianten im Rahmen des Hypothesentests

	<b>H<sub>0</sub> angenommen</b>	<b>H<sub>0</sub> abgelehnt</b>
<b>H<sub>0</sub> richtig</b>	Sicherheit 1. Art (1- $\alpha$ )	Fehler 1. Art ( $\alpha$ -Fehler)
<b>H<sub>0</sub> falsch</b>	Fehler 2. Art ( $\beta$ -Fehler)	Sicherheit 2. Art (1- $\beta$ ; auch als Power/Teststärke bezeichnet)

Wie bereits erwähnt, hängt die Art des statistischen Tests stark von der Verteilung der Daten ab. Grundsätzlich kann hier zwischen parametrischen und nicht-parametrischen Tests unterschieden werden. Die Grundvoraussetzung für parametrische Tests sind normalverteilte Daten, das Vorliegen einer Normalverteilung wird mittels schließender Statistik überprüft (z. B. Kolmogorov-Smirnov-Test). Weniger hohe Anforderungen oder andere Schwerpunktsetzungen an die Daten stellen die nicht-parametrischen Tests, welche Vorteile hinsichtlich des Umgangs mit extremen Werten bzw. Ausreißern und der Standardisierung schiefer Datenverteilungen bieten. Aufgrund der hohen Variabilität und der teilweise kleinen Anzahl an Stichproben in verhaltensbiologischen Studien spielen die nicht-parametrischen Tests hier eine große Rolle (MARTIN & BATESON 2007, NAGUIB 2006). Als Nachteil dieser Testkategorie ist jedoch anzuführen, dass eine Auswertung multivariater Datensätze, in denen parallel verschiedene Parameter auf das beobachtete Verhalten einwirken können, häufig nicht möglich ist (NAGUIB 2006). Hier müssen parametrische Verfahren herangezogen werden. Da diese stets eine Normalverteilung voraussetzen, müssen nicht normalverteilte Daten zunächst transformiert werden, um sie einem parametrischen Test unterziehen zu können.

Einen Überblick über die verschiedenen statistischen Tests gibt Tab. 2-5.

Tab. 2-5: Überblick über verschiedene statistische Tests (mit Fallbeispielen) (nach BÜHNER &amp; ZIEGLER 2009, verändert und ergänzt)

Die Hypothese testet auf einen Unterschied zwischen verschiedenen Stichproben									
Es liegen individuelle Messwerte vor (z. B. Zeiten)									
Unterteilung der Stichproben nach einem Faktor (z. B. Strömungsgeschwindigkeit)									
... in zwei Gruppen (z. B. 0.3   0.5 m/s)			... in mehr als zwei Gruppen (z. B. 0.3   0.5   0.8   1.0 m/s)			... nach mehreren Faktoren (z. B. Fischart, Strömungsgeschwindigkeit, Rechenstabsabstand)		Es liegen Häufigkeiten vor	
unabhängige Stichproben (Individuen werden nur einmal getestet)	keine Normalverteilung	keine Varianzhomogenität	abhängige Stichproben (Individuen werden in beiden Gruppen getestet)	unabhängige Stichproben (Individuen werden nur einmal getestet)	abhängige Stichproben (Individuen werden in den verschiedenen Gruppen getestet)	unabhängige Stichproben	abhängige Stichproben	bei kleinen Stichproben	Chi-Quadrat-Anpassungstest
Normalverteilung	Varianzhomogenität	keine Varianzhomogenität	keine Normalverteilung	Normalverteilung	keine Varianzhomogenität	keine Normalverteilung	Normalverteilung	Chi-Quadrat-Homogenitätstest	Fishers Exakter
Mann-Whitney-U-Test	gepaarter t-Test	Wilcoxon-Test für Paardifferenzen	Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA*)	Kruskal-Wallis-Test	Repeated Measure ANOVA	Friedmann-Test	Repeated Measure MANOVA	Zwei- bzw. Multifaktorielle Varianzanalyse (MANOVA*)	Chi-Quadrat-Homogenitätstest

Über die in Tab. 2-5 aufgeführten Testverfahren hinaus lassen sich außerdem Regressionsanalysen durchführen. Diese dienen dazu, den Einfluss einer oder mehrerer unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable (z. B. ein bestimmtes Verhalten des Fisches) zu untersuchen. Neben der linearen Regressionsanalyse, die für normalverteilte Daten genutzt wird, gibt es die generalisierte lineare Regressionsanalyse (GLM = generalisiertes lineares Modell), die auch bei fehlender Normalverteilung der abhängigen Variable angewendet werden kann (NELDER & WEDDERBURN 1972).

### Zusammenfassung:

Um beobachtetes Verhalten statistisch auszuwerten, gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten (Abb. 2-9). Mithilfe der deskriptiven Statistik kann ein erster Überblick über die Daten bzw. deren Verteilungen, beispielsweise in Form von Tabellen oder Diagrammen, geschaffen werden. Die daraus resultierenden Lageparameter und Streuungsmaße bieten weiter die Grundlage für die schließende Statistik. Mittels der schließenden Statistik kann der Einfluss eines oder auch mehrerer Parameter auf ein beobachtetes Verhalten untersucht werden. Die schließende Statistik bietet weiter die Möglichkeit, von der getesteten Stichprobe Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit (z. B. Population, Art, Geschlecht) zu ziehen und allgemeingültige Aussagen zu treffen. Die deskriptive Statistik dient in Verbindung mit dem Einsatz von Expertenwissen als Interpretationsgrundlage für die Ergebnisse der schließenden Statistik (Abb. 2-9).

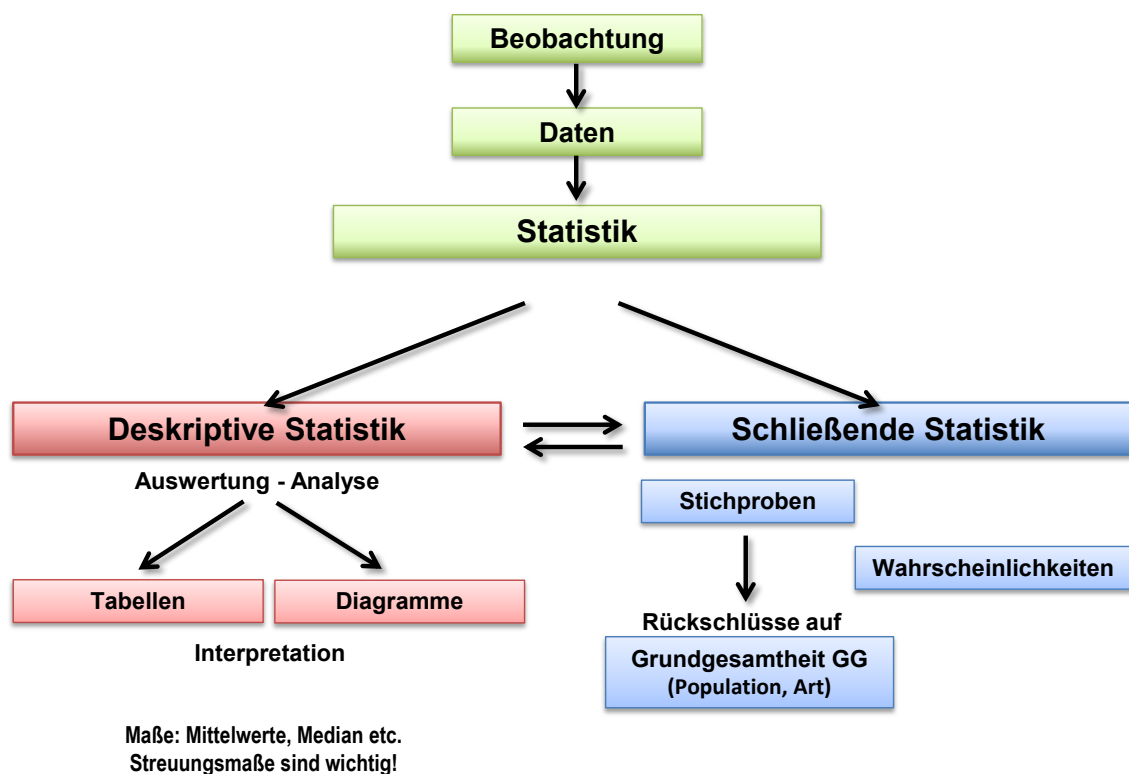


Abb. 2-9: Überblick über die Säulen der statistischen Auswertung von Daten

## 2.2 Verhaltensforschung in der Fischökologie

Das von der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL 2000/60/EG 2000) geforderte Ziel zum Erreichen des guten ökologischen Zustandes bzw. Potenzials ist eng an den Referenzzustand eines Gewässers gekoppelt. Der Referenzzustand eines Gewässers orientiert sich an dem natürlichen Zustand, der sich einstellen würde, wenn keine oder nur geringfügige anthropogene Einflüsse gegeben wären. Im Rahmen von Bewirtschaftungsplänen wurden Maßnahmen zur Erreichung der sogenannten Bewirtschaftungsziele (z. B. guter ökologischer Zustand) von den Bundesländern für die einzelnen Gewässereinzugsgebiete erarbeitet (BMUB & UBA 2016). Für die Bewertung eines Gewässers sind dabei biologische, chemische sowie physikalische und strukturelle Merkmale von Bedeutung. Im Falle der biologischen Qualitätskomponenten spielt neben der aquatischen Flora und der Wirbellosenfauna (Makrozoobenthos) die Fischfauna als Indikator eine wesentliche Rolle. Für die entsprechenden Gewässer gibt es als Maß für einen guten ökologischen Zustand bzw. gutes ökologisches Potenzial die sogenannte Referenzfischfauna, die in ihrer Zusammensetzung und mit den entsprechenden Anteilen gegeben sein muss. Für die gelisteten Fischarten ist es notwendig, die Herstellung der auf- und abwärtsgerichteten Durchgängigkeit zu realisieren. Dabei muss auch der chemische Zustand des Gewässers und sein Einfluss auf die Fischfauna beachtet werden. Im Rahmen der EU-WRRL sind der Fischschutz und die Herstellung der Durchgängigkeit als indirektes Ziel zu verstehen.

Auch vor der Implementierung der EU-WRRL in die nationalen Gesetze gab es bereits Bestrebungen, im Zuge der Gewässerbewirtschaftung das Verhalten von Fischen (im Speziellen das Wanderverhalten) zu berücksichtigen. Die Gründe für das Engagement bestanden wohl in dem starken Rückgang der Populationen, insbesondere der wirtschaftlich bedeutsamen Arten, wie Lachs, Stör oder Maifisch (DVWK 1996) durch den zunehmenden Ausbau der Gewässer und der damit verbundenen Verschlechterung der Gewässerqualität. Eine detaillierte Zusammenfassung des historischen Vorkommens und der wirtschaftlichen Bedeutsamkeit ausgewählter Fischarten in Nordrhein-Westfalen findet sich in HOFFMANN (2010).

Die Erarbeitung und Umsetzung der Maßnahmen aus den zur Umsetzung der EU-WRRL entwickelten Bewirtschaftungsplänen ist an strenge Fristen gebunden. Werden die Ziele der Richtlinie nicht fristgerecht (bis 2027) umgesetzt, kann die Europäische Kommission dem betroffenen Mitgliedsstaat bzw. im Falle von der Bundesrepublik Deutschland, den Bundesländern Strafgelder auferlegen (LAND MVP 2009). Somit spielt das Erreichen der Ziele auch aus wirtschaftlicher Sicht eine wichtige Rolle. Es ist daher von großer Bedeutung, Maßnahmen durchzuführen, die ein hohes Maß an Effektivität aufweisen.

Neben der EU-WRRL tangieren ebenfalls die europäische Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-RL 92/43/EWG 1992) sowie die europäische Aal-Verordnung (1100/2007) und die nationalen Rechtsvorgaben in den Wasser-, Fischerei- und Naturschutzgesetzen die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit (vgl. EBEL 2018).

Studien, die sich mit der Erforschung der Verhaltensweisen von Fischen in ihrem natürlichen Habitat beschäftigen, können dabei wichtige Erkenntnisse in Hinblick auf die

Anforderungen der Tiere in Bezug auf Strömungs- und Abflussverhältnisse oder die stofflichen und strukturellen Bedingungen liefern (ADAM & LEHMANN 2011). Dementsprechend sind verhaltensbiologische Studien mit Fischen für die Umsetzung in der wasserbaulichen Praxis von zentraler Bedeutung, insbesondere im Hinblick auf die o. g. Forderungen der EU-WRRL zur Herstellung des guten ökologischen Zustandes der Gewässer (ADAM & LEHMANN 2011).

In der Geschichte der Verhaltensforschung sind bereits früher einige Untersuchungen zum Verhalten von Fischen durchgeführt worden, allerdings ohne direkten Bezug zur wasserbaulichen Praxis. Dabei finden sich kaum Untersuchungen zu einheimischen Fischarten, vielmehr aber Untersuchungen zu Meeres- oder Aquarienfischen. So sind in der Literatur einige Studien zu Guppys (KODRIC-BROWN 1985) oder zu Zebraäbblingen (vgl. MORETZ et al. 2007) zu finden. In Bezug auf heimische Fischarten gibt es detaillierte Untersuchungen zu den Fortpflanzungsstrategien bzw. dem Balzverhalten des Dreistachligen Stichlings (TINBERGEN 1952, 1967).

Während zum Ende des 20. Jahrhunderts bereits einige Erkenntnisse aus dem Monitoring an Fischlauf- und -abstiegsanlagen aus dem Freiland vorlagen und Eingang in diverse wasserbautechnische Regelwerke fanden (DVWK 1996, DWA 2005, LAVES 2006), entwickelte sich Anfang des 21. Jahrhunderts das Forschungsfeld der Ethohydraulik (LEHMANN et al. 2009, ADAM & LEHMANN 2011).

### **2.2.1 Forschungsfeld „Ethohydraulik“**

Das Forschungsfeld der Ethohydraulik ist ein Spezialgebiet der Ökohydraulik<sup>8</sup> (vgl. MADDOCK et al. 2013) und legt seinen Fokus auf die Erforschung von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Fließzuständen und dem Verhalten aquatischer Organismen. Die Basis dieser wissenschaftlichen Transdisziplin bildet dabei die Synthese der biologischen Teildisziplin der Verhaltensforschung und dem ingenieurwissenschaftlichen Gebiet der Hydraulik. Der Kern dieses interdisziplinären Forschungsfeldes ist die Beobachtung des Verhaltens von Fischen unter standardisierten Laborbedingungen in einem sog. Ausschnittsmodell<sup>9</sup>. Die gewonnenen Erkenntnisse können als Grundlage für die Umsetzung einer fischverträglichen Gewässernutzung in Form von fischrelevanten Bemessungsgrundlagen mit entsprechenden Grenz- und Richtwerten in der wasserbaulichen Praxis angewendet werden (ADAM & LEHMANN 2011).

In den Jahren 2007 bis 2009 fassten ADAM & LEHMANN (2011) alle bisherigen Erkenntnisse aus Laboruntersuchungen zu Fischen in ihrem Buch „Ethohydraulik“ zusammen. Unter anderem wird hier eine Methodik zur Durchführung von Lebendtierbeobachtungen im Rahmen von komplexen hydraulischen Situationen beschrieben (LEHMANN et al. 2009).

---

<sup>8</sup> Interdisziplinäres Forschungsfeld, das sich mit den Wechselwirkungen physikalischer, biologischer und chemischer Prozesse in aquatischen Ökosystemen beschäftigt

<sup>9</sup> Abbildung wesentlicher Segmente einer Realsituation aus dem Freiland im Labormodell im Maßstab 1:1

Die Ethohydraulik versteht sich dabei als „Erweiterung des klassischen wasserbaulichen Versuchswesens um den biologischen Aspekt der Lebedntierbeobachtung“ (ADAM & LEHMANN 2011).

### **Vorgehensweise der Ethohydraulik**

Das Forschungsfeld der Ethohydraulik baut auf einem mehrstufigen methodischen Vorgehen auf. Im Fokus steht dabei insbesondere die Beschreibung von hydraulisch-taktilen Verhaltensmustern von Fischen auf qualitativer Ebene. Die methodische Vorgehensweise sieht bisher allerdings keine Aufnahme zählbarer Ereignisse mit anschließender Auswertung mittels schließender Statistik vor.

Das Herzstück des Forschungsfeldes bilden die drei Phasen der Ethohydraulik. Diese sind im Einzelnen in der Abb. 2-10 dargestellt.

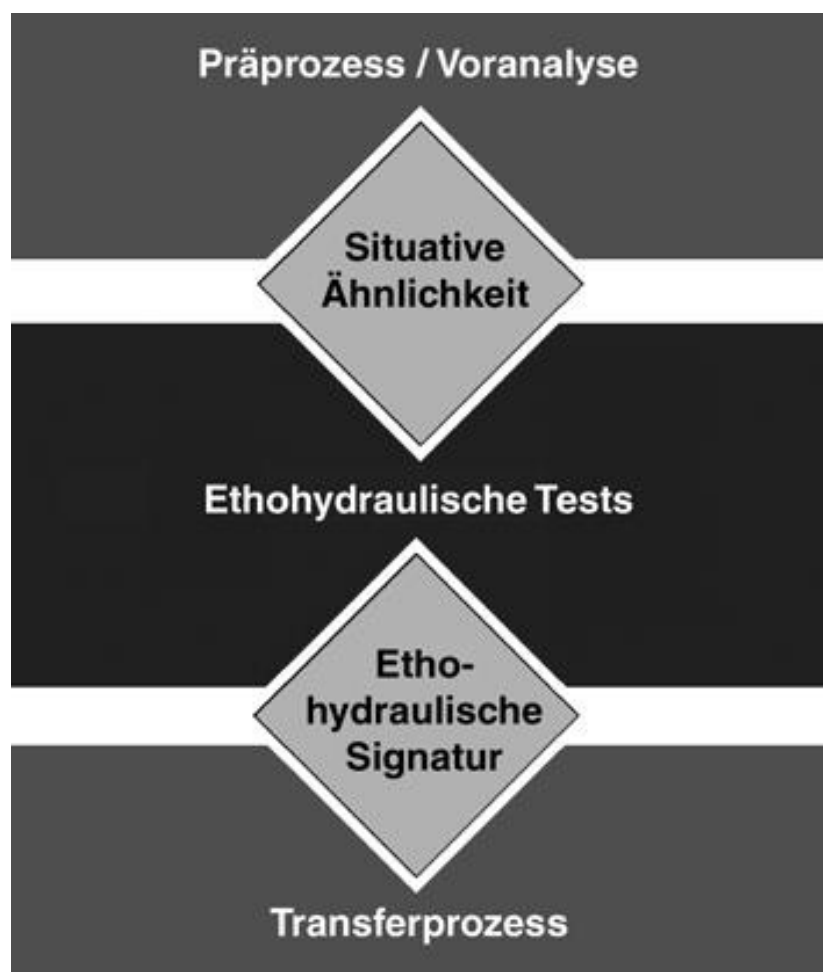


Abb. 2-10: Drei Phasen der Ethohydraulik (Quelle: ADAM & LEHMANN 2011)

In der ersten Phase, dem Präprozess bzw. der Voranalyse, werden komplexe bauliche und hydraulische Gegebenheiten im realen Maßstab in einem sogenannten Ausschnittsmodell abgebildet. Dabei ist sicherzustellen, dass die Fische mit einem dem Freiland vergleichbarem Verhalten reagieren, wobei wiederum die Kenntnis über arttypische Verhaltensweisen von zentraler Bedeutung ist. Die Vergleichbarkeit zwischen der Situation im Freiland und dem Modell wird als situative Ähnlichkeit bezeichnet. Das

„situativ ähnliche Modell“ muss alle wesentlichen Eigenschaften der Situation im Freiland abbilden. Parameter dafür sind zum Beispiel die Geometrie der zu testenden Struktur, Fließgeschwindigkeiten, der Abfluss und die Wasserspiegellagen (ADAM & LEHMANN 2011). Schwierigkeiten kann der enorme Platzbedarf eines solchen Modells darstellen, der bei einer exakten Darstellung der zu untersuchenden hydraulischen Situation erforderlich ist. Ohne die situative Ähnlichkeit sind in der Regel keine ethohydraulischen Untersuchungen möglich. Eine Validierung des Modells kann mit Naturmesskampagnen oder einer hydrodynamisch-numerischen Strömungssimulation erfolgen. Da es schwierig ist, die komplexen baulichen und hydraulischen Bedingungen, die im Freiland herrschen, in einer Laborrinne abzubilden, ist darauf zu achten, die für das Fischverhalten primär relevanten Parameter zu berücksichtigen.

In der zweiten Phase, den ethohydraulischen Tests, wird das Verhalten von Fischen im situativ ähnlichen Modell unter festgelegten Bedingungen beobachtet. Dabei sollen solche Verhaltensweisen identifiziert werden, die eine Reaktion auf die jeweilig eingestellte hydraulische oder strukturelle Situation darstellen. Hierbei werden beispielsweise Verhaltensweisen wie Flucht-, Sondier- oder Meideverhalten aufgenommen. In einem weiteren Schritt gilt es zu erarbeiten, welcher Parameter (Reiz), in welchem Wertebereich die beobachtete Verhaltensweise (Reaktion) auslöste bzw. beeinflusste und diesen Parameter mittels Messungen zu quantifizieren (ADAM & LEHMANN 2011). Das Ergebnis dieser Messungen wird als ethohydraulische Signatur bezeichnet (LEHMANN 2017).

Die aus den Untersuchungen hervorgehenden Erkenntnisse in Form der Verhaltensbeobachtungen und der damit verknüpften ethohydraulischen Signatur werden in der dritten Phase, dem sog. Transferprozess, auf das Freiland übertragen. Die Strömungssituation unterliegt im Freiland in der Regel komplexeren Bedingungen als im Labor. Daher gilt es, die ethohydraulische Signatur mithilfe von geeigneten Maßnahmen (Bauwerke, Betriebsweisen) sicherzustellen und stabil einzustellen (ADAM & LEHMANN 2011, LEHMANN 2017). Aufgrund der multifaktoriellen Gegebenheiten im Freiland sind hier weitere Untersuchungen zur Validierung des Prototyps vorzunehmen.



### 2.2.2 Methoden zur Erfassung von Fischverhalten

Anders als bei terrestrischen Lebewesen, die beispielsweise mittels Ferngläsern o. ä. direkt beobachtet werden können (vgl. Kap. 2.1.1), kommt im Rahmen der Verhaltensforschung von aquatischen Organismen erschwerend hinzu, dass sich die Testorganismen in der Regel in ihrem natürlichen Habitat nur schwer beobachten lassen. Insbesondere die Trübung des Wassers und das fehlende Licht im Rahmen nächtlicher Aufnahmen stellen einen limitierenden Faktor dar.

Mittels der Ethohydraulik kann das Verhalten von Fischen unter standardisierten Bedingungen im Labor untersucht werden (vgl. Kap. 2.2.1). Einen großen Vorteil bietet hierbei die gute Wasserqualität im Labor, die in der Regel eine uneingeschränkte Sicht auf die Testorganismen vom Beobachtungsstand aus ermöglicht (Abb. 2-2). Eine Einschränkung ethohydraulischer Untersuchungen besteht jedoch darin, dass in den Modellversuchen häufig nur ein Ausschnittsmodell getestet werden kann. Die Validierung der Erkenntnisse vor dem Hintergrund der großräumigen Situation findet dann im Transferprozess (Phase 3, vgl. Abb. 2-10) im Freiland statt.

Um das Verhalten von Fischen in ihrer natürlichen Umgebung zu beobachten, bieten sich verschiedene Möglichkeiten. Mit dem Einsatz der im Folgenden dargestellten Methoden können auch hier Daten gewonnen werden, deren Aussagekraft wiederum mit statistischen Methoden abgesichert werden kann.

Abb. 2-11 bietet einen Überblick über mögliche Methoden zur Erfassung von Fischverhalten im Freiland.

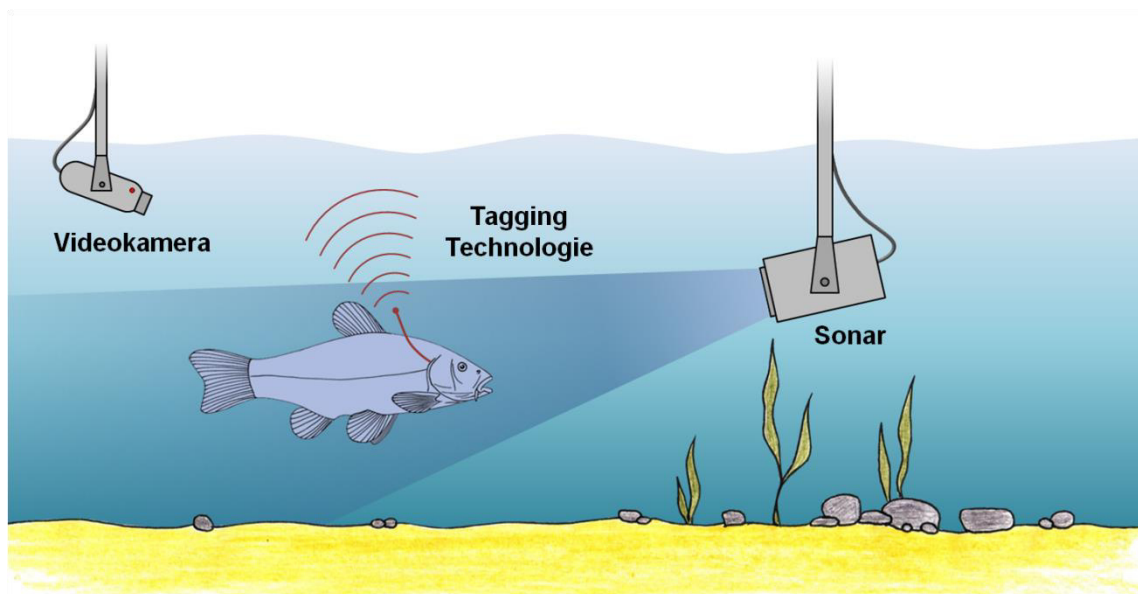


Abb. 2-11: Überblick über verschiedene Möglichkeiten zur Erfassung von Fischverhalten im Freiland (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER)

Über die im Folgenden dargestellten Verfahren hinaus finden sich detaillierte Ausführungen und zusätzliche Informationen zu verschiedenen Methodiken der Erfassung von Fischverhalten (u. a. auch Farbmarkierungen, Netze, Hamen) in DUMONT et al. (2012) oder SCHMALZ et al. (2015).

## **Videoaufnahmen**

Eine Möglichkeit zur Beobachtung von Fischverhalten *in situ* ist die Verwendung von Videokameras. Ein Vorteil dieser Technik liegt in ihrer vergleichsweise kostengünstigen Anschaffung. Sie erreicht jedoch insbesondere im Freiland mit zunehmender Trübung des Wassers rasch ihre Grenzen. In Gewässern mit geringer Trübung (z. B. alpine Gewässer, Abschnitte unterhalb von Talsperren), stellen Videokameras allerdings eine gute Alternative zu anderen Methoden dar. Für eine standardisierte Auswertung des Videomaterials müssen jedoch zwingend einige Voraussetzungen erfüllt sein. So ist zu beachten, dass Videokameras relativ wartungsintensiv sind, während der Aufnahme ist die Pflege der Linse unabdingbar. Insbesondere Algen und verschiedene Mikroorganismen, die während des Verbleibs des Gerätes im Wasser auf der Linse wachsen und so die Videoqualität einschränken, stellen hier ein Problem dar. Nach einer Reinigung ist zwingend darauf zu achten, dass die Kamera wieder exakt in der ursprünglichen Position und Ausrichtung installiert wird, um eine Vergleichbarkeit der Daten gewährleisten zu können.

Da Videokameras in der Nacht an ihre Grenzen stoßen, ist der Einsatz von Licht unabdingbar. Allerdings ist der Einfluss auf das Verhalten der Fische während des Einsatzes in der Nacht zu berücksichtigen. So gibt beispielsweise PAVLOV (1989) Hinweise darauf, dass Fische bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen Verhaltensunterschiede zeigen. Auch ein Effekt von Infrarotlicht auf das Verhalten von Fischen kann nicht ausgeschlossen werden. Nach ADAM & LEHMANN (2011) sind z. B. einige Karpfenartige, Welse und Barsche in der Lage, Infrarotlicht mit einer Wellenlänge von 850 nm wahrzunehmen. In Bezug auf Laboruntersuchungen könnte sich eine Verzerrung der situativen Ähnlichkeit ergeben, da einige Fische dann in der Lage sind, sich optisch zu orientieren, was im Freiland nicht der Fall wäre.

Vom Umweltbundesamt wird empfohlen, von Beobachtungen mit sichtbarem Licht abzusehen, da dies sowohl abschreckende als auch anziehende Wirkung auf Fische haben kann (SCHMALZ et al. 2015). Momentan laufen Untersuchungen an der TU Darmstadt, die neue Erkenntnisse über den Einfluss von Licht auf das Verhalten von Fischen erbringen werden, die es zu berücksichtigen gilt (vgl. Untersuchungen von IfÖ und TU Darmstadt<sup>10</sup>).

## **„Riverwatcher“**

Ein weiteres System zur optischen Erfassung von Fischen ist der „Riverwatcher“<sup>11</sup> der isländischen Firma Vaki (MOCKENHAUPT & KLÜBER 2015). Die Firma ist weltweit führend bei der Entwicklung und Herstellung spezieller Techniken im Bereich der Fischzählung in Aquakulturen sowie von Systemen zur Fischbestandserhebung und -bewirtschaftung, insbesondere für Großsalmoniden. Der „Riverwatcher“ kann in verschiedenen Ausführungen installiert werden, wobei eine Scannereinheit die zentrale

---

<sup>10</sup> [www.dbu.de/projekt\\_33647/01\\_db\\_2409.html](http://www.dbu.de/projekt_33647/01_db_2409.html)

<sup>11</sup> [www.riverwatcher.is/features](http://www.riverwatcher.is/features)

funktionelle Komponente darstellt (Abb. 2-12a). Diese besteht aus zwei gegenüberliegenden Platten. Dabei stehen sich jeweils zwei vertikal angeordnete Reihen von Infrarotlichtschranken gegenüber. Beim Schwimmen eines Fisches durch diese Lichtschranken entstehen durch die Unterbrechung der Lichtsignale Informationen, die zur Erstellung von Silhouetten (Arterkennung, Größe, Höhe des Fisches) und der Schwimmrichtung (Auf- bzw. Abstieg) dienen (SCHLETTERER et al. 2015). Die Scannereinheit kann auch mit einer Kamera und einer Lichtquelle gekoppelt werden (Abb. 2-12b), wobei zwischen sichtbarem Licht und Infrarotlicht variiert werden kann. Es sind dabei die genannten möglichen Nachteile bei der Verwendung von Licht zu beachten. Nachteile des „Riverwatchers“ bestehen an Standorten, an denen durch Treibgut, starke Wassertrübung oder Luftblasen keine optimalen Bedingungen vorherrschen. Durch derartige Artefakte können dann durch die automatische Erfassungssoftware Fehlzählungen entstehen (SCHLETTERER et al. 2015).

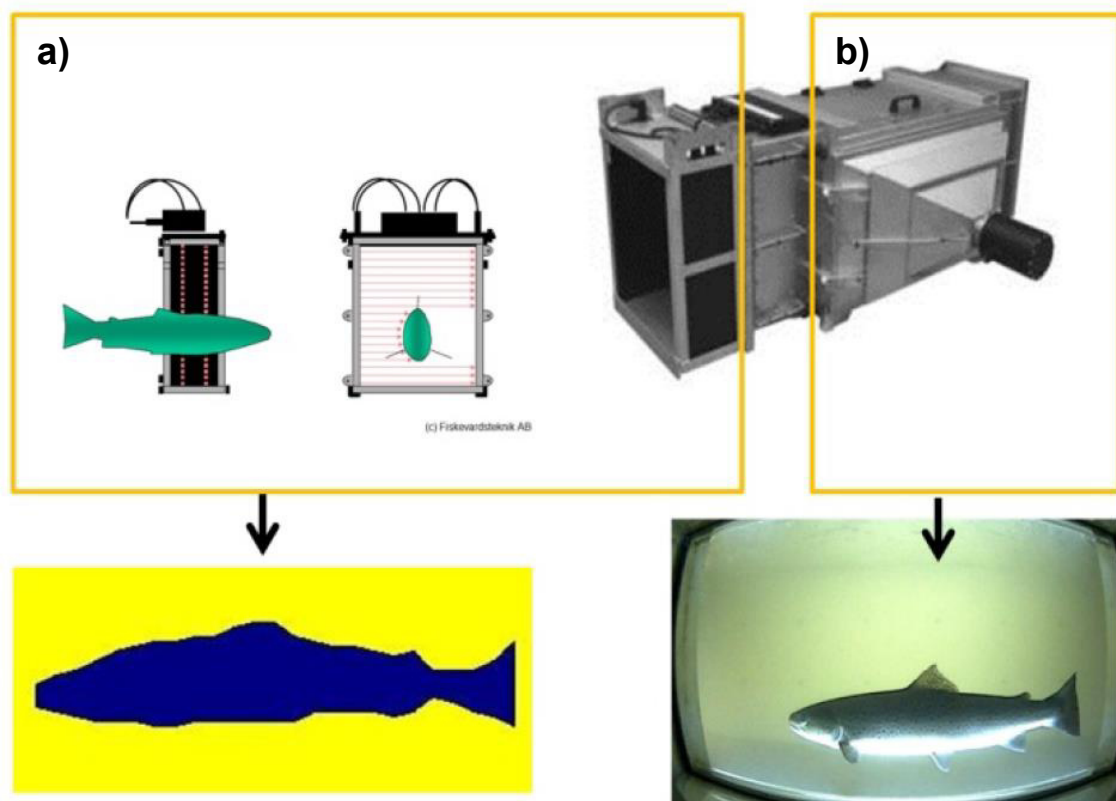


Abb. 2-12: Einzelne Komponenten und Funktionsweise des „Riverwatchers“, a) Scannereinheit mit Infrarotsensoren, b) Kameraeinheit (Quelle: MOCKENHAUPT & KLÜBER 2015, verändert)

Der „Riverwatcher“ kann zur Untersuchung von Fischwanderungen, z. B. an Fischaufstiegsanlagen oder anderen Engstellen, eingesetzt werden, die Fische im Rahmen ihrer Wanderung passieren müssen. Das System liefert jedoch lediglich die Information, zu welcher Zeit ein Fisch den Einbauort passiert hat. Verhaltensweisen von Fischen können damit nicht analysiert werden.

### **Imaging Sonar**

Wo optische Sensoren und Kameras aufgrund schwieriger Bedingungen, wie sie etwa nachts oder bei trübem Wasser vorherrschen, an ihre Grenzen kommen, können Sonare Abhilfe schaffen (SCHMIDT 2006, SCHMIDT 2007, HOFFMANN et al. 2010, LANGKAU et al. 2016, SCHMIDT et al. 2018). Sonare bieten die Möglichkeit, Fische und ihr Verhalten mithilfe von Schallwellen *in situ* zu erfassen (vgl. Abb. 2-13b-d). Die aufgenommenen sogenannten Echos des ausgesendeten Signals werden vom Sonar in digitale Bilder umgewandelt und können durch eine hohe Einzelbildanzahl pro Sekunde video-gleich aufgezeichnet werden. Momentan stellen das DIDSON (Dual-Frequency IDentification SONar) sowie das Nachfolgergerät ARIS (Adaptive Resolution Imaging Sonar, vgl. Abb. 2-13a) den aktuellen Stand der Technik der sogenannten Visualisierungs-Sonare dar ([www.soundmetrics.com](http://www.soundmetrics.com)).

Die Einsatzmöglichkeiten von Sonaren sind sehr vielfältig und ermöglichen u. a. die Erfassung und Untersuchung von Fischwanderungen oder des Fischverhaltens an Wasserkraftanlagen, Bypass-Systemen, Wehren und anderen Wanderbarrieren und sind somit für Monitoring-Untersuchungen an Fischauf- und -abstiegsanlagen geeignet. Der Einsatz derartiger Geräte ermöglicht detaillierte Verhaltensbeobachtungen im vom Sonar abgebildeten Beobachtungskegel.

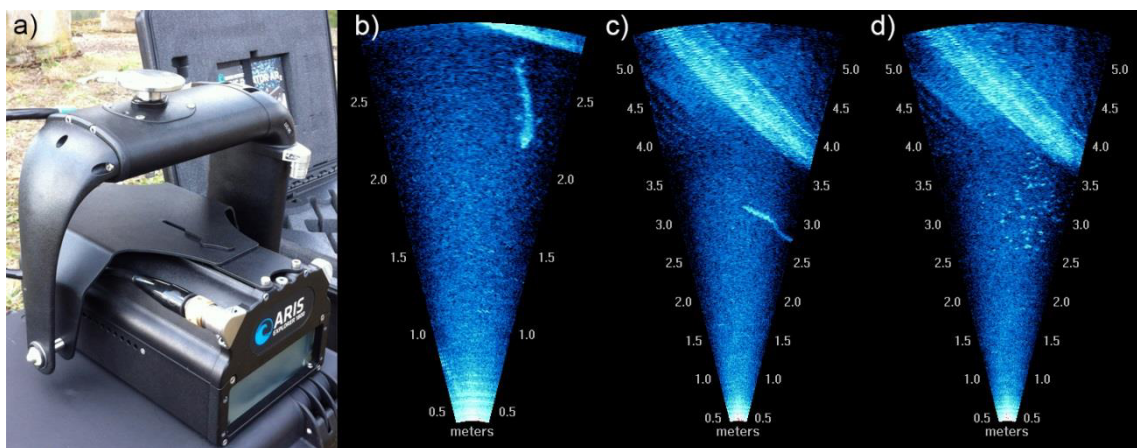


Abb. 2-13: a) Adaptive-Resolution-Imaging-Sonar (ARIS); Sonaraufnahmen von b) Fischen bzw. c) Aalen und d) Fischschwärmen im Schallkegel (Quelle: SCHMIDT et al. 2018)

### **Aktive und passive Tagging-Technologien**

Eine weitere, allerdings invasive Art, das Verhalten von Fischen zu untersuchen, bietet das sog. Tagging. Diese Technologie bietet die Möglichkeit, die Anwesenheit von Fischen an einem Ort oder auch ihre Bewegungen in einem bestimmten Untersuchungsbereich zu detektieren. So ist es beispielsweise möglich, die Auffindbarkeit und Akzeptanz von Rechen-Bypass-Systemen oder deren Passierbarkeit zu untersuchen. Es wird zwischen aktiven und passiven Tagging-Technologien unterschieden.

Aktive Tagging-Technologien können neben der Detektion von Fischen an einem Ort auch individuelle Schwimmwege aufnehmen (FREUND & HARTMANN 2002, DENG et al. 2011, ØKLAND et al. 2016). Bei dieser Technologie werden die Signale aktiv an einen Empfänger gesendet; der Transmitter (Sender) benötigt dazu eine leistungsstarke

Batterie. Es wird hierbei weiter zwischen der Radiotelemetrie und der akustischen Telemetrie unterschieden. Der wesentliche Unterschied besteht in der Art der Tags und der ausgesendeten Signale sowie der damit verbundenen Leistungsfähigkeit.

Mit der Radiotelemetrie ist es möglich, verschiedene Daten über größere Entfernungen (bis zu 500 m) zu senden (SCHMALZ et al. 2015). Der Radiotransmitter sendet dabei ein Radiosignal mit einer bestimmten Wellenlänge (zwischen 147 und 168 MHz) aus, das von einem Empfänger aufgenommen wird (Abb. 2-14).

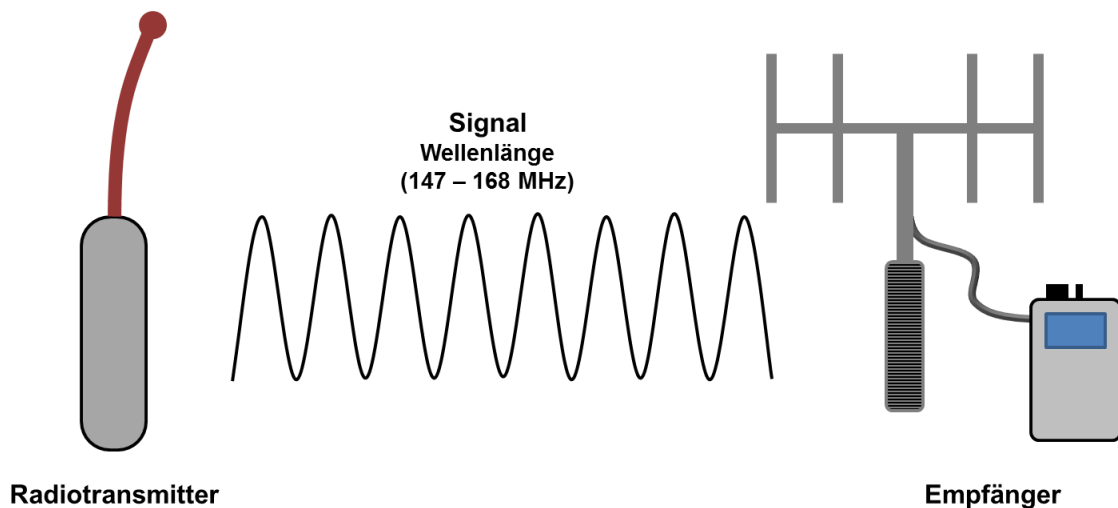


Abb. 2-14: Schematischer Überblick über die Funktionsweise eines Radiotransmitters (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER)

Darüber hinaus können mittlerweile verschiedenste Daten Aufschluss über das Migrationsverhalten von Tieren geben. Neben GPS-Daten zur Bestimmung der horizontalen Koordinaten kann z. B. die vertikale Lokation über dem Boden (z. B. Höhe eines Vogels im Baum) oder unter der Wasseroberfläche (Tiefe eines schwimmenden Fisches) aufgenommen werden (WHITE & GARROT 1990). Auch können über das Tagging physiologische Informationen, wie beispielsweise die Herzfrequenz eines Tieres, aus der Ferne gemessen werden und so z. B. Aufschluss über die Aktivität geben (KENWARD 1987).

Bei den akustischen Tags sendet der Transmitter spezifische Töne im Ultraschallbereich aus (65,5 bis 76,8 kHz), die für eine individuelle Kennzeichnung sorgen. Die Signale werden unter Wasser mittels Hydrophonen erfasst (Abb. 2-15). Im Vergleich zur Radiotelemetrie bieten akustische Systeme die Erfassung größerer Reichweiten von bis zu 800 m Entfernung sowie die Möglichkeit, Tiere individuell zu erfassen (DUMONT et al. 2012, SCHOLTEN 2010). Anders als die Radiotelemetrie bietet diese Technologie die Möglichkeit, Daten nicht nur im Süß-, sondern auch im Salzwasser zu empfangen (SCHOLTEN 2010, DUMONT et al. 2012). Mittels der akustischen Tagging-Technologie ist es über die Kreuzpeilung mehrerer Hydrophone auch möglich, die Schwimmwege der Fische zwei- und dreidimensional aufzunehmen (SCHMALZ et al. 2015, ADAM et al. 2013).

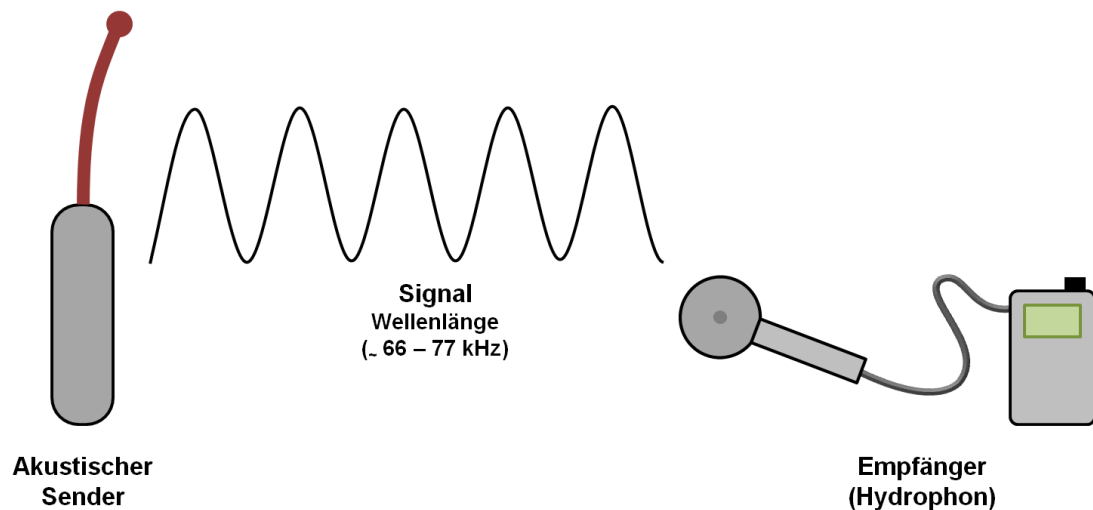


Abb. 2-15: Schematischer Überblick über die Funktionsweise eines akustischen Senders (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER)

Passive Tagging-Technologien (Radio Frequency Identification, RFID) benötigen neben den Sendern (Passive Integrated Transponder, PIT-Tags) feste Empfängerantennen. Bei Annäherung eines Tags (Sender) an eine solche Antenne wird der Tag mittels elektromagnetischer Impulse der Antenne aktiviert, woraufhin er wiederum einen Impuls mit individueller Kennung (Tag-ID) zurücksendet, der von einem Dekoder aufgezeichnet wird (ADAM et al. 2013) (Abb. 2-16). Somit wird das zu empfangene Signal, anders als bei den aktiven Tags, nicht kontinuierlich gesendet; die integrierte Batterie besitzt damit eine längere Lebensdauer. Damit werden Daten zu Datum und Uhrzeit der Annäherung sowie zum Individuum (Art, Größe, Gewicht, Ort des Einsetzens) gesammelt. Bei der Kopplung mehrerer Antennen im Fließgewässerlängsgradienten können Rückschlüsse über die Schwimmwege der Fische gezogen werden (vgl. WÖLLECKE et al. 2016). Die Transponder sind in verschiedenen Varianten verfügbar und besitzen, je nach Anwendungsbereich, unterschiedliche Größen.



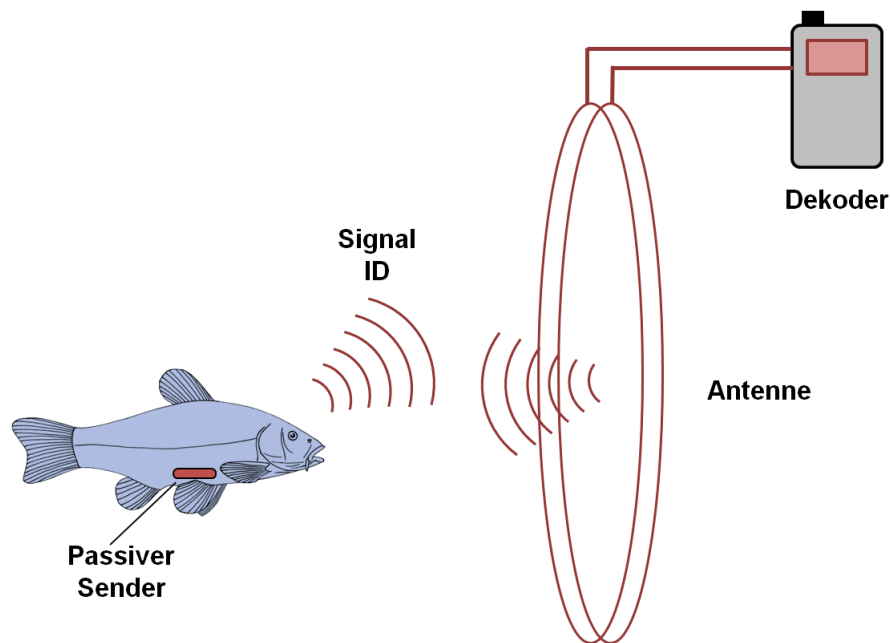


Abb. 2-16: Schematischer Überblick über die Funktionsweise eines passiven Senders (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER)

### Sensorfisch

Eine weitere Möglichkeit, Fischabstiegsanlagen zu evaluieren oder Gefahrenbereiche von Wasserkraftanlagen (Turbinen) zu lokalisieren, bieten sogenannte Sensorfische. Diese sind in der Lage, eine passive Drift von Fischen zu simulieren und bieten, je nach Ausführung, die Möglichkeit der Erfassung und Speicherung verschiedener physikalischer Parameter (SCHMALZ et al. 2015). Dabei ermöglichen interne Module eine Messung der Kapsel-Ausrichtung, der Temperatur, der Druckverhältnisse, der gerichteten Beschleunigung aller drei Raumdimensionen und der Geschwindigkeit der Winkelveränderung in drei Ebenen (Rotation) (Abb. 2-17). Die aufgenommenen Daten können im Anschluss an die Bergung ausgelesen werden (SCHMALZ et al. 2015). Die mit Sensoren ausgestatteten Dummies wurden vom Pacific Northwest National Laboratory in Zusammenarbeit mit der Pacific North Division entwickelt (DENG et al. 2014). Eine detaillierte Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten findet sich u. a. in KLOPRIES (2018).

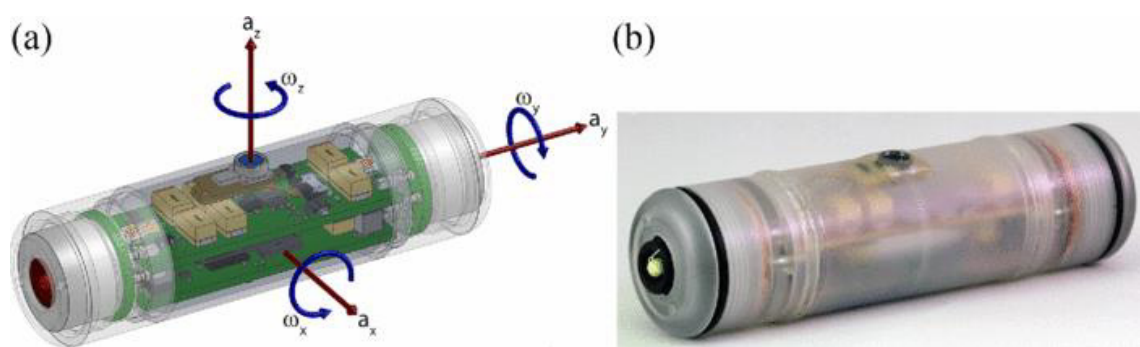


Abb. 2-17: a) Schema und b) Foto des „Sensor-Fischs“ (Quelle: DENG et al. 2014)

### **Ethohydraulische Modellierung**

Eine andere Möglichkeit, das Verhalten von Fischen zu untersuchen, bietet die ethohydraulische Modellierung. Die Modellierung von Fischverhaltensweisen hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen und bietet derzeit eine Forschungsgrundlage für verschiedene wissenschaftliche Arbeitsgruppen. In diesem Forschungsfeld werden hydrodynamisch-numerische Strömungssimulationen mit ethohydraulischen Verhaltensmustern gekoppelt, woraus sich ein neues Instrument zur Analyse von Ergebnissen ethohydraulischer Versuche ergibt (SCHNEIDER 2017) und zudem Prognosen zum Fischverhalten in großräumigen Situationen möglich werden.

ABDELAZIZ (2013) erarbeitete numerische Modelle<sup>12</sup>, um aufwärtsgerichtete Bewegungsmuster von Fischen zu modellieren und so Hinweise zur Passierbarkeit von Fischaufstiegsanlagen zu gewinnen. Das Modell wurde anhand von Freilanddaten validiert. Auch die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) führt seit 2015 in enger Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ein Forschungsprojekt zur Entwicklung eines neuen Ansatzes zur individuenbasierten Modellierung durch. Mittels eines Modells wird das Verhalten „virtueller Fische“ in einem numerischen Strömungsmodell abgebildet. Dazu wurde das in einer Versuchsrinne beobachtete Verhalten wilder Bachforellen unter festgelegten hydraulischen Bedingungen untersucht, um so „typische Verhaltensmuster für die Entwicklung, Kalibrierung und Validierung des neuen Verhaltensmodells zu identifizieren“ (BAW 2018, vgl. auch GISEN 2018). Das Modell soll in der späteren Bewertung der Effizienz von Fischaufstiegsanlagen genutzt werden.

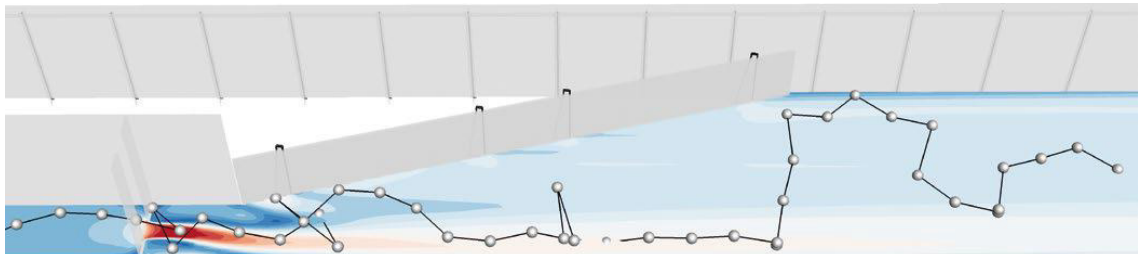


Abb. 2-18: Modellierter Schwimmpfad einer Bachforelle (Quelle: BAW 2018)

Es ist denkbar, dass numerische Auswertungen den eigentlichen ethohydraulischen Untersuchungen vorgeschaltet werden, um so frühzeitig Artefakte oder für die Fische ungünstige Strömungsmuster zu erkennen und das Versuchsssetup entsprechend anzupassen. Dies würde den Bedarf an Versuchstieren verringern.

---

<sup>12</sup> Computergestützte Simulation auf der Grundlage mathematischer Modelle



### 2.2.3 Fischphysiologische Grundlagen

Grundlage einer Interaktion eines Organismus mit seiner Umwelt bildet die Verarbeitung von Informationen und Reizen. Durch die Aufnahme von Reizen und deren Verarbeitung kann der Organismus eine dem Reiz entsprechende Reaktion bzw. Verhaltensweise zeigen. Reaktionen bzw. Verhaltensweisen können so als Antwort auf biotische und abiotische Reize der Umwelt angesehen werden. Dabei ist die Art und Weise, wie Reize und Informationen aus der Umwelt aufgenommen und verarbeitet werden, vom jeweiligen Organismus abhängig.

Eine Aufnahme von Reizen findet über spezialisierte Rezeptoren statt, die in ihrer Gesamtheit komplexe Systeme bilden. Diese Systeme werden auch als Sinnesorgane bezeichnet. Die Sinnesorgane sind in ihrer Ausprägung an die jeweiligen Bedingungen angepasst, denen der betrachtete Organismus ausgesetzt ist. So haben Fische als Anpassung an ihren Lebensraum im Wasser im Laufe der Evolution spezialisierte Sinnesorgane ausgebildet. Als ein spezifisches Sinnesorgan, das bei terrestrischen Lebewesen nicht zu finden ist, sei hier das Seitenliniensystem zu nennen (HILDEBRANDT et al. 2015).

Die Kenntnis über die Aufnahme und Verarbeitung von Reizen bei Fischen ist für die Interpretation von Verhaltensmustern und Reaktionen auf bestimmte Reize im Rahmen ethohydraulischer Untersuchungen von zentraler Bedeutung.

Damit während der ethohydraulischen Untersuchungen mit Fischen keine Artefakte generiert werden, die zu eventuellen Fehlinterpretationen führen könnten, bedarf es Grundlagenwissen in Bezug auf die Physiologie der Fische (hier in Bezug auf die Teilklasse Teleostei, Echte Knochenfische). Die Kenntnis über die einzelnen Sinnesorgane sowie das Wissen über die Lebensweise und den Lebensraum ist unabdingbar, um die beobachteten Verhaltensweisen vor dem Hintergrund des arttypischen Verhaltens zu bewerten und die Relevanz dieser auf eine zu untersuchende Struktur oder einen Parameter im Labor einzuordnen (ADAM & LEHMANN 2011).

Wer sich beispielsweise einem Gewässer nähert, sieht die Fische häufig sofort wegschwimmen; Fische registrieren die Bewegung sehr schnell und fliehen, allein schon, um einem eventuellen terrestrischen Prädator zu entkommen. Aufgrund dieser Sensibilität bei der Wahrnehmung von Menschen wird im Folgenden ein Fokus auf diejenigen Sinnesorgane gelegt, die es dem Fisch ermöglichen, einen Experimentator wahrzunehmen. Die jeweiligen physiologischen Fähigkeiten von Fischen müssen bei der Durchführung eines Experimentes berücksichtigt werden, damit es nicht zu einer Beeinflussung des arttypischen Verhaltens der Probanden kommt. Erst dann sind Aussagen einer möglichen Abhängigkeit eines beobachteten Verhaltens von einem untersuchten Parameter und eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf das Freiland möglich.

Die Abb. 2-19 zeigt einen schematischen Überblick über jene Sinnesorgane der Fische, die im Folgenden näher beleuchtet werden. Wie bei vielen anderen Wirbeltieren auch, sind einige Sinnesorgane meist besser ausgebildet als die des Menschen.

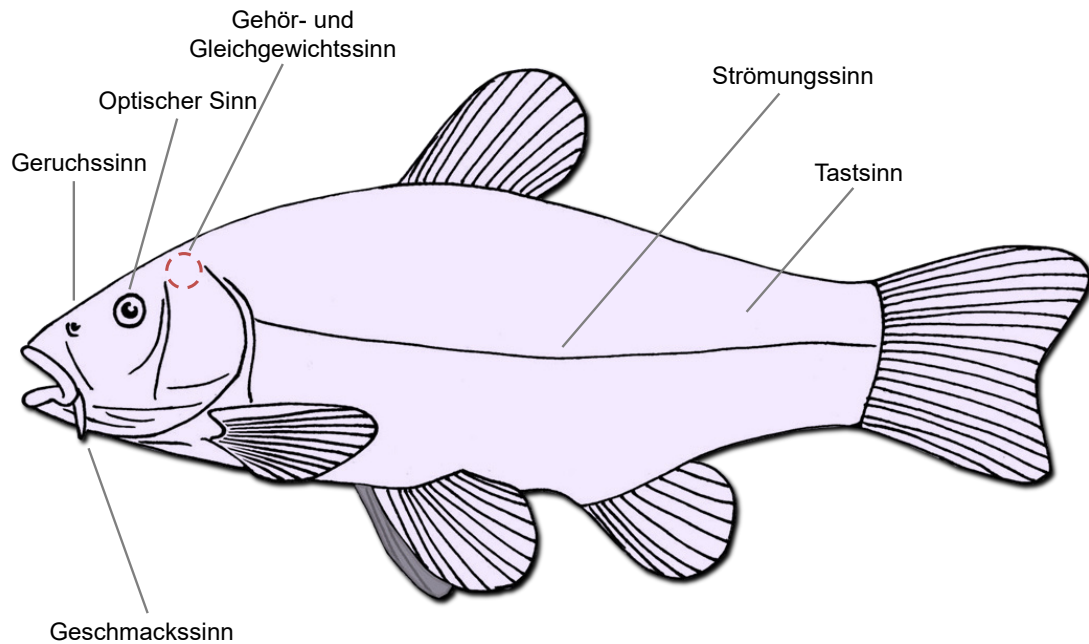


Abb. 2-19: Die wesentlichen Sinnesorgane der Echten Knochenfische (Teleostei) (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER)

### **Optischer Sinn**

Der anatomische Aufbau des Auges der Fische gleicht denen anderer Wirbeltiere. Mit den zwei hochentwickelten Linsenaugen ist es Fischen möglich, Formen und Farben zu erkennen. Im Gegensatz zu den Augen der terrestrischen Wirbeltiere ist die Linse der Knochenfische kugelförmig ausgebildet (MUUS & DAHLSTRÖM 1993) (Abb. 2-21). Die im Augapfel befindliche Linse kann mithilfe des Linsenmuskels (*Musculus retractor lentis*) verschoben werden. Durch die Veränderung des Abstandes zwischen Linse und Netzhaut (Retina) wird es dem Fisch ermöglicht, im Nah- sowie im Fernbereich zu sehen (Abb. 2-20). Bei Säugetieren hingegen erfolgt das Fokussieren des Auges, die sog. Akkomodation, mittels einer Formveränderung; dabei wird die Linse abgeflacht (MUUS & DAHLSTRÖM 1993, HILDEBRANDT et al. 2015).

Die Linse projiziert ein verkleinertes und inverses Bild auf die Netzhaut (Abb. 2-20). Dieses wird mittels der Sinneszellen in der Netzhaut aufgenommen und über den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet, wobei das Bild in der Wahrnehmung schlussendlich wieder „umgedreht“ wird. Die Sinneszellen lassen sich dabei in die Stäbchen, die für die Helligkeitswahrnehmung zuständig sind und die Zapfen, die das Farbsehen ermöglichen, unterteilen (ADAM & LEHMANN 2011). Die Retina wird von der Aderhaut mit Blut versorgt. Die das Auge umgebende Lederhaut sorgt für die nötige Stabilität und dient als Schutz vor Verletzungen. Die Iris, die als Blende zur Regulierung des Lichteinfalls fungiert, verleiht dem Auge seine Farbe, die im Falle der Rotaugen sogar namensgebend ist (Abb. 2-22).

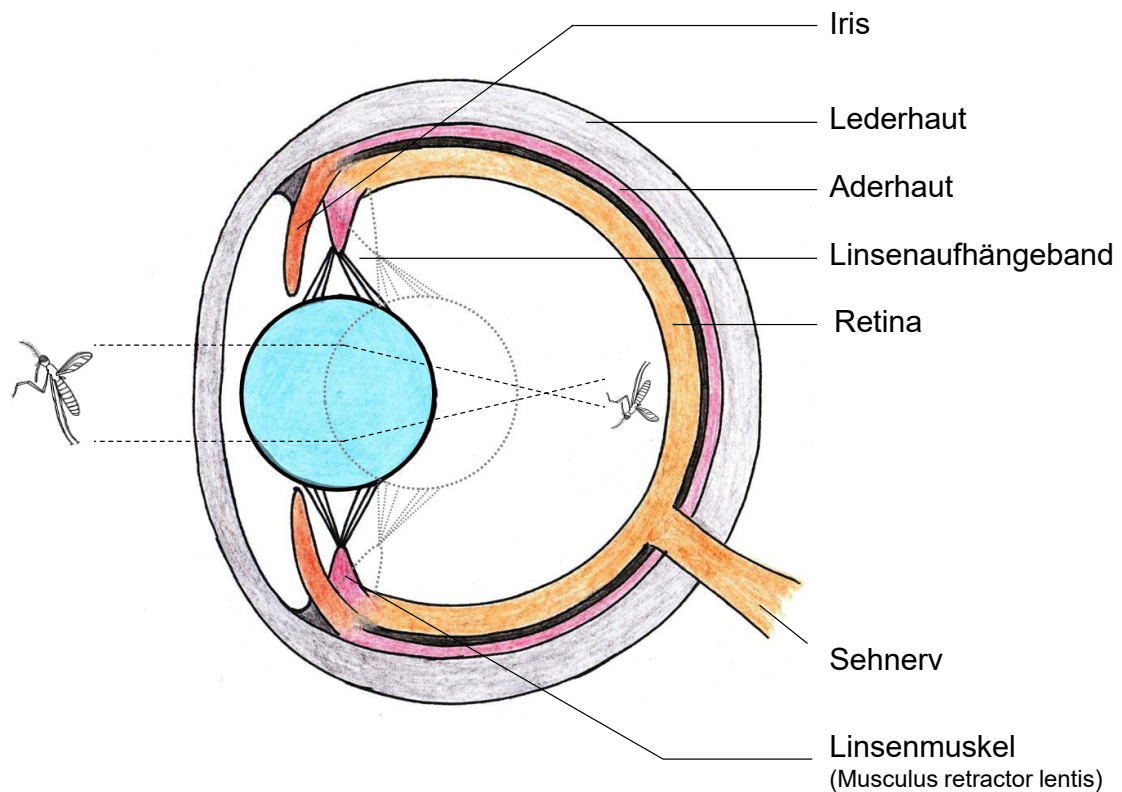


Abb. 2-20: Schematische Darstellung eines Fischeauges; grau gepunktet: Akkomodation mittels Lageveränderung der Linse (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER)



Abb. 2-21: Nahaufnahme des Kopfbereiches eines Hechtes (*Esox lucius* L.) mit deutlich sichtbarer Linse im Auge (Bild: PIET SPAANS, CC BY-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>), <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PikeHead.JPG>)



Abb. 2-22: Rotaugen (*Rutilus rutilus* L.) mit rot gefärbter Iris

Fische sind in der Lage, ihre Augen zur Veränderung des Blickwinkels zu bewegen. Je nach Lebensweise und Habitat sind die Augen verschiedener Arten speziell an die jeweiligen Bedingungen angepasst. So verfügen tagaktive Fische, wie Hechte, Barsche oder Forellen über auffallend große Augen; nachtaktive oder bodenorientierte Arten, wie z. B. Aal oder Schmerle besitzen eher kleine Augen mit einer geringeren Leistungsfähigkeit (KAESTNER 1991).

Die Sichtweite im Wasser kann durch Schwebstoffe begrenzt sein (HAMMER et al. 2010). Fische besitzen im Vergleich zum Menschen ein größeres Sehfeld (HEINTGES 2016). Jedes Auge hat vertikal ein Feld von bis zu ca. 150° (NICOL 1989). Auf horizontaler Ebene kann ein Feld von bis zu 180° (NICOL 1989, LAND & NILSSON 2012) (Abb. 2-23) abgedeckt werden. Im Überschneidungsbereich beider Felder ist das Sehvermögen besonders gut ausgeprägt. Dieses sog. binokulare Feld kann in einem Bereich zwischen 4° (z. B. Knurrhahn) und 40° (z. B. Hecht) liegen (TAMURA 1957, NICOL 1989, HILDEBRANDT et al. 2015).



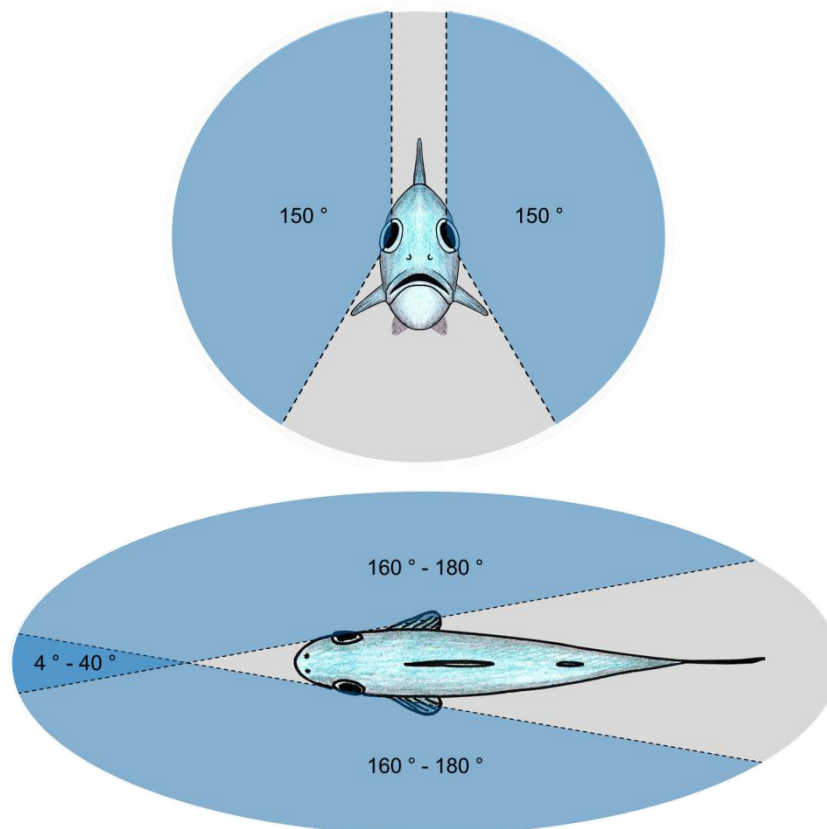


Abb. 2-23: Vertikale Ausdehnung des Sehfeldes eines Fisches (oben) und horizontale Ausdehnung (unten), hellblau = monokulares Sichtfeld; dunkelblau = binokulares Sichtfeld; grau = toter Winkel (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER)

Gegenstände außerhalb des Wassers sehen Fische nur mit eingeschränktem Sichtfeld. Der Grund hierfür liegt in den unterschiedlichen Brechungsindizes von Luft und Wasser. Fische besitzen oberhalb der Wasseroberfläche ein Sehfeld von ca.  $98^\circ$  (MUUS & DAHLSTRÖM 1993).

Aufgrund der guten Ausprägung des optischen Sinnes der Fische ist zu beachten, dass Versuchstiere, die für ethohydraulische Untersuchungen verwendet werden, durchaus in der Lage sind, den Experimentator zu bemerken. Daher ist es wichtig, bei ethohydraulischen Versuchen innerhalb des Sehfeldes der Probanden keine schnellen Bewegungen zu vollziehen, die das natürliche Verhalten der Fische beeinflussen könnten. Als besonders praktikabel haben sich sogenannte Beobachtungsstände erwiesen. Hierbei handelt es sich um abgedunkelte, minimalistisch eingerichtete Räume, aus denen Beobachtungen durchgeführt werden können, ohne dass der Fisch den Experimentator hinter der Glasscheibe wahrnehmen kann (vgl. Kap. 4.1.1.5).

Bei der Planung von ethohydraulischen Untersuchungen ist auch zu berücksichtigen, dass Fische Wechsel zwischen hellen und dunkleren Bereichen bzw. unterschiedliche Kontraste wahrnehmen können (BONE & MARSHALL 1985). In Untersuchungen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) konnte beobachtet werden, dass sich Fische bevorzugt im Bereich von Schatten aufhielten (vgl. BÖCKMANN et al. 2015).

Bei der Durchführung von Untersuchungen zur diurnalen Aktivität in der Dämmerung bzw. Nacht ist zu beachten, dass hier das optische Beobachtungsvermögen des Experimentators an seine Grenzen stößt. Der Einsatz von Infrarotlicht (IR-Licht) kann hier Abhilfe schaffen, wobei jedoch zu berücksichtigen ist, dass einige Fischarten in der Lage sind, IR-Licht wahrzunehmen und dadurch im Labor ggf. beeinflusst werden können (ADAM & LEHMANN 2011).

### **Seitenliniensystem / Strömungssinn**

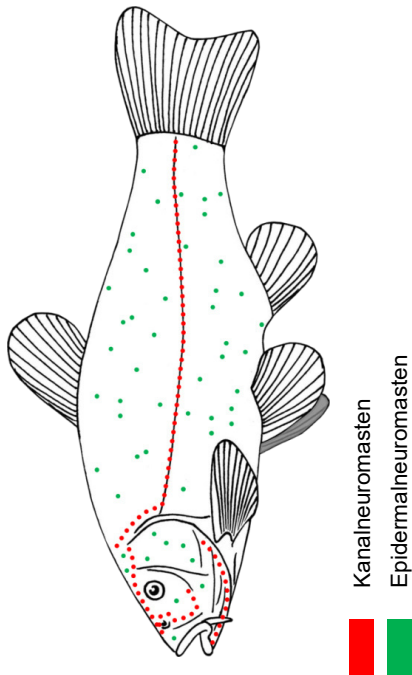
Auch bei starker Einschränkung der optischen Wahrnehmung, z. B. durch Trübung des Wassers, sind Fische in der Lage, sich ein genaues Bild der weiträumigen Umgebung zu verschaffen. Hierfür verantwortlich ist ein hochspezialisiertes Sinnesorgan, welches ausschließlich in der Gruppe der Fische zu finden ist: das Seitenliniensystem. Mittels des Seitenliniensystems kann der Fisch kleinste Wasserbewegungen und feinste Druckunterschiede des Wassers rezipieren, dieses dient somit als Ferntastsinn (BLECKMANN & ZELICK 2009, HEINTGES 2016). Informationen, die der Fisch über das Seitenliniensystem erhält, dienen zum Auffinden von Beute, zur räumlichen Orientierung, zur Rezeption von Prädatoren, zur Koordination des Verhaltens im Schwarm oder zur intraspezifischen Kommunikation beispielsweise bei der Balz (BLECKMANN & ZELICK 2009, KLEIN & BLECKMANN 2015).

Sogenannte Neuromasten bilden als kleinste funktionelle Einheit die Grundlage des Seitenliniensystems. Sie befinden sich sowohl auf der Kopf- oder Körperoberfläche (Epidermalneuromasten) als auch in Kanälen (Kanalneuromasten), die unter der Haut verlaufen und über Poren mit dem Außenmedium in Verbindung stehen (BLECKMANN et al. 2004).

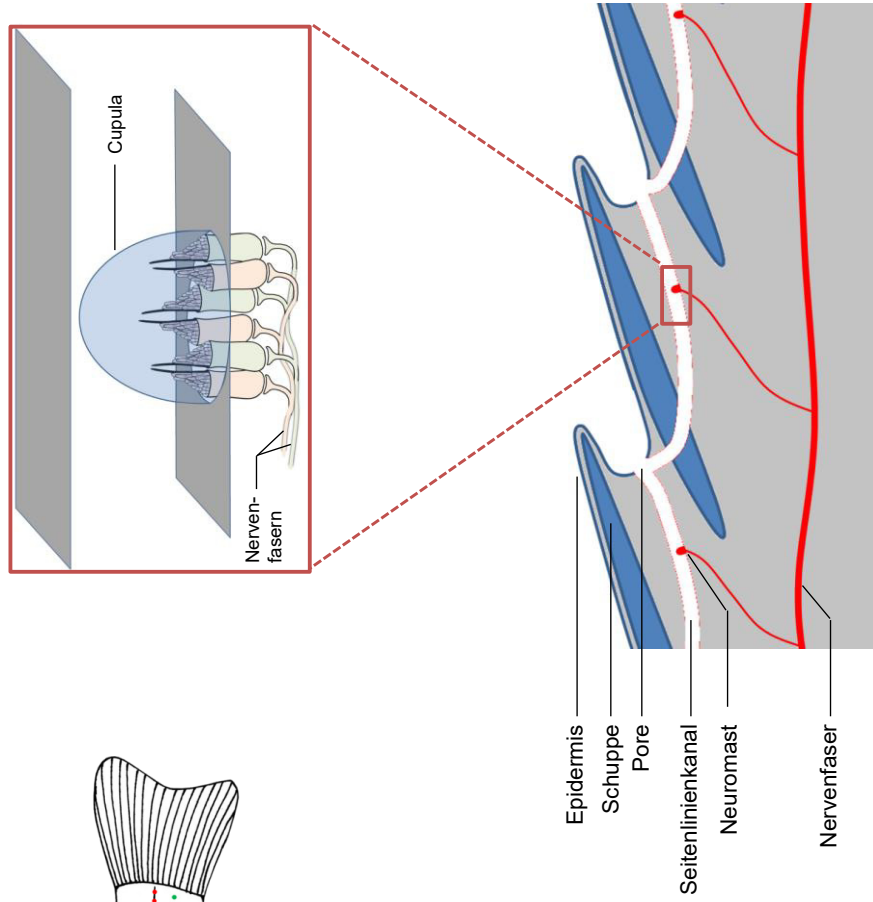
Die sensorische Einheit, der Neuromast, besteht bei den Epidermalneuromasten aus einigen Dutzend, bei Kanalneuromasten sogar aus bis zu mehreren Tausend Haarsinneszellen (BLECKMANN et al. 2004). Diese Haarsinneszellen setzen sich wiederum aus einem randständigen Kinozilium und einer Vielzahl von Stereovilli zusammen. Die Stereovilli nehmen in Richtung des Kinozilium gleichförmig zu (Abb. 2-24b). Über den Neuromasten befindet sich die sogenannte Cupula, eine gallertige Struktur.

Die Haarsinneszellen sind in gegensätzlicher Weise (antagonistisch) angeordnet und über afferente, d. h. zum Gehirn führende, Nervenfasern mit dem zentralen Nervensystem verbunden. Durch die antagonistische Ausrichtung der Haarsinneszellen ist der Fisch in der Lage, Bewegungen in beiden Richtungen voneinander zu unterscheiden (BONE & MOORE 2008, FLOCK & WERSÄLL 1962). Jede dieser afferenten Nervenfasern steht dabei nur mit solchen Haarsinneszellen in Kontakt, die die gleiche Ausrichtung haben (BLECKMANN et al. 2004). (Abb. 2-24). Darüber hinaus besitzen die Haarsinneszellen efferente, d. h. vom Gehirn wegführende, Synapsen. Die physiologische Bedeutung dieser efferenten Innervation ist bisher nicht bekannt. Denkbar ist ein Herabsetzen der Empfindlichkeit von den Haarsinneszellen bei Schwimmbewegungen des Fisches (MÜNZ 1989, KAESTNER 1991, BLECKMANN et al. 2004, BONE & MOORE 2008).

## a) Lage der Neuromasten



## c) Seitenlinie mit Kanalneuromast in Vergrößerung



## b) Schema einer Haarsinneszelle

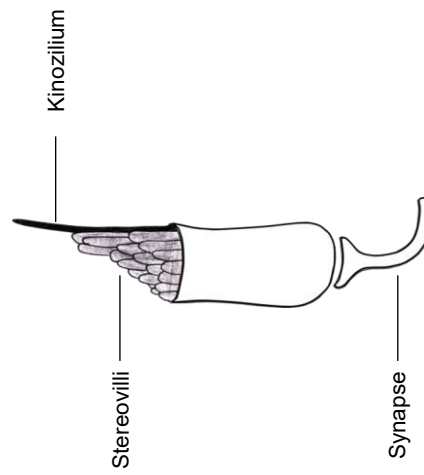


Abb. 2-24: Schematischer Überblick über a) die Lage der verschiedenen Neuromasten auf der Körperoberfläche des Fisches, b) die einzelnen Komponenten der Haarsinneszelle sowie c) der Seitenlinie mit entsprechenden Kanalneuromasten in Vergrößerung (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER)

Abb. 2-25 zeigt eine Detailaufnahme des Seitenliniensystems auf der Flanke eines Döbels. Die Poren des Systems, die mit dem Außenmedium (Wasser) in Verbindung stehen, sind als schwarze Punkte zu erkennen. Abb. 2-26 stellt den Verlauf des Seitenliniensystems einer Nase im Überblick dar. Das System der Kanalneuromasten auf der Flanke des Fisches beginnt hinter den Kiemen und verläuft bis zur Schwanzwurzel.



Abb. 2-25: Flanke eines Döbels mit Seitenlinienorgan (roter Rahmen) (*Squalius cephalus* L.)  
(Bild: BUGEFi, verändert)

Das Seitenliniensystem der Fische weist eine hohe morphologische Variabilität auf (BLECKMANN et al. 2004), die nicht mit der biosystematischen Einteilung der Arten korreliert werden kann. Demnach spielen die Fortbewegung eines Fisches, die Lebensweise oder auch die hydrodynamischen Bedingungen im jeweiligen Lebensraum eine Rolle für die Ausprägung des Seitenliniensystems (BLECKMANN et al. 2004). So besitzen limnophile<sup>13</sup> Fische häufig eine höhere Anzahl an Epidermalneuromasten als rheophile<sup>14</sup> Fische. Rheophile Fische zeigen dagegen ein ausgeprägteres Kanalsystem (BLECKMANN et al. 2004, HILDEBRANDT et al. 2015).

---

<sup>13</sup> Langsam fließende oder stehende Gewässer bevorzugend

<sup>14</sup> Schnell fließende Gewässer bevorzugend





Abb. 2-26: Nase mit deutlich erkennbarem Seitenliniensystem (*Chondrostoma nasus* L.) (Bild: BUGEFI)

BLECKMANN et al. (2004) geben in ihrer Veröffentlichung „Wie Fische Wasser fühlen“ einen Überblick über die verschiedenen Wasserbewegungen, die ein Fisch über das Seitenliniensystem rezipieren kann: So können kleinste Wasserbewegungen und Druckschwankungen, die Kleinstlebewesen (z. B. Flohkrebse) erzeugen, rezipiert werden (I). Derartig schwache Reize können vom Seitenliniensystem jedoch nur in unmittelbarer Nähe aufgenommen werden. Im Gegensatz dazu stehen Wirbelbewegungen, die von schwimmenden Fischen beispielsweise durch Flossenbewegungen entstehen, die im Stillwasserbereich selbst nach einigen Minuten noch rezipiert werden können. Über solche Wirbelringe kann ein Fisch die Bewegung eines anderen Fisches genauestens analysieren. Der Fisch erlangt über die Seitenlinie Informationen über die Größe eines anderen Fisches, seine Schwimmgeschwindigkeit und Schwimmrichtung, aber auch über die Zeit, die seit der Entstehung der Bewegung vergangen ist (II) (HANKE et al. 2000). Ein Fisch kann ein sehr genaues Bild seiner Umgebung generieren, indem er die Reaktion des Mediums auf seine eigenen Bewegungen analysiert (Vorbeischwimmen an Steinen etc.) (III). Weiter spielt die Wahrnehmung von Oberflächenwellen eine zentrale Rolle bei der Nahrungssuche, wenn sich beispielsweise Fluginsekten auf der Wasseroberfläche niederlassen (IV).

Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass Fische allein über ihr Seitenliniensystem in der Lage sind, sich ein genaues Bild von ihrer Umgebung zu erstellen. Die Empfindlichkeit der Rezeptoren ist bemerkenswert. So sind Fische in der Lage, Wasserbewegungen von 0,1 bis hin zu 0,01 Mikrometer zu rezipieren; dies entspricht einem zehntausendstel bis einem hunderttausendstel Millimeter (BLECKMANN et al. 2004).

Die hohe Sensibilität des Seitenliniensystems wurde schon früh am Beispiel des Schwarzen Degenfischs (*Aphanopus carbo* LOWE) aufgezeigt. Berechnungen von PUMPHREY (1950) zeigten, dass diese Art ihre Beute aus einer Distanz von 32 m wahrnehmen kann (vgl. BONE & MARSHALL 1985). Der Degenfisch ist dabei in der Lage, die Nahfeldeffekte, die von Bewegungen seiner Beute ausgehen, mittels seines Seitenliniensystems zu rezipieren (BONE & MOORE 2008). Damit seine eigenen Bewegungen keine Störungen verursachen, kann sich der Fisch mittels einer speziell angepassten Schwanzflosse (Schwanzgabel) langsam der Beute nähern, ohne dass sein Körper störende Wasserbewegungen erzeugt.

Freiland-Beobachtungen an heimischen Fischarten zeigen, dass Fische, bei Annäherung an eine Barriere (z. B. Rechen oder Wehrüberfall) zunächst eine Sondierung des Hindernisses vornehmen (BUGEFi et al. 2014, BUGEFi 2014). Abb. 2-27 zeigt das Sondierungsverhalten eines Aals (Länge ca. 90 cm) vor einer überströmten Wehranlage. Dabei schwimmt das Tier zunächst rheotaktisch negativ (Ausrichtung in Fließrichtung) an das Wehrfeld heran, schwimmt einen Bogen, um dann entgegen der Strömung wieder in das Oberwasser zu schwimmen (vgl. BUGEFi et al. 2014).

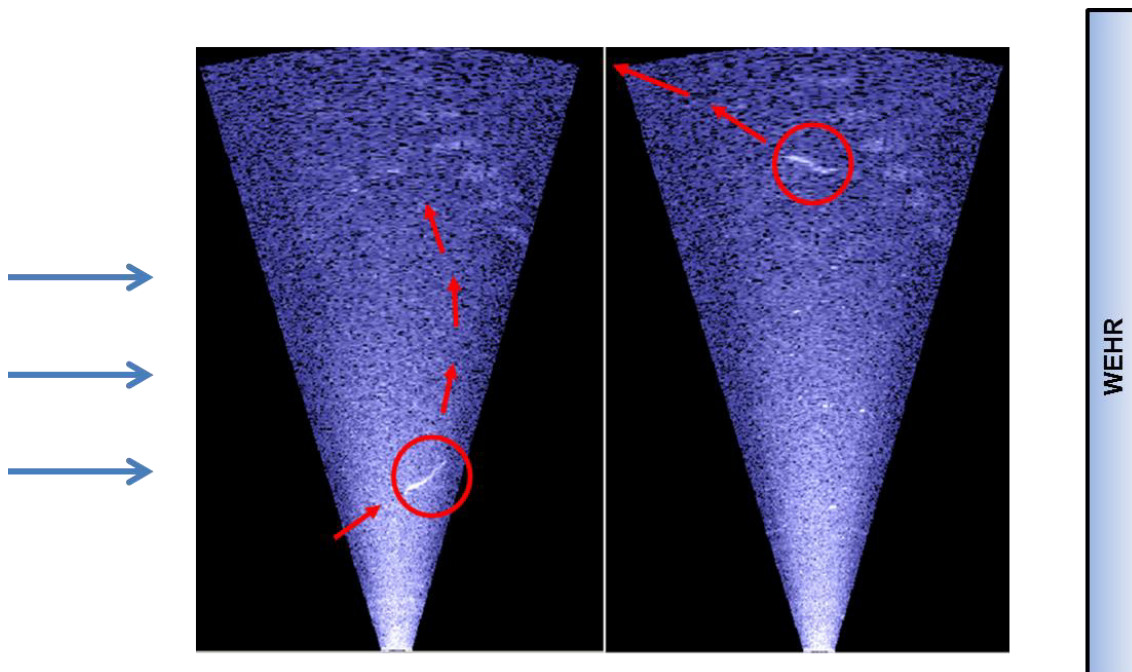


Abb. 2-27: Sonaraufnahmen eines Aals am Wehrfeld einer Wasserkraftanlage a) beim Sondieren und b) anschließenden Zurückschwimmen ins Oberwasser, blaue Pfeile = Fließrichtung, rote Pfeile = Bewegungsrichtung des Aals. Die Wehrkante befindet sich ca. 5 m rechts des Schallkegels des Sonars (Quelle: BÖCKMANN et al. 2013, verändert)

Durch die hohe Sensibilität des Seitenliniensystems nehmen Fische die hydraulischen Reize ihrer Umwelt besonders differenziert wahr. Daher ist insbesondere das strömungsbasierte Leiten von Fischen Grundlage vieler ethohydraulischer Untersuchungen zum Fischeauf- und -abstieg. Auch wird untersucht, wie man Fische mithilfe von Verwirbelungen oder Turbulenzen aus bestimmten Bereichen fernhalten kann. Wichtig hierbei ist, dass im Rahmen von Versuchen andere Sinnesreize sowie Parameter, die Artefakte generieren können (beispielsweise Licht/Schatten) weitestgehend reduziert bzw.

ausgeschlossen werden. So konnten auch ADAM & LEHMANN (2011) zeigen, dass die entscheidende Grundlage für das Verhalten von Fischen in ethohydraulischen Tests die Strömungswahrnehmung darstellt.

### **Tastsinn**

Fische können über auf der Körperoberfläche befindliche freie Nervenenden Reize wie Druck oder Temperatur wahrnehmen (KAESTNER 1991, HILDEBRANDT et al. 2015). Diese Nervenenden befinden sich am ganzen Körper, speziell jedoch am Kopf, an den Barteln und den Flossen (KAESTNER 1991). Dieser Sinn dient in erster Linie zur Rezeption des näheren Umfeldes. Die freien Nervenenden reagieren dabei auch auf direkte Berührung (HEINTGES 2016).

### **Gehör- und Gleichgewichtssinn**

Fische besitzen kein äußeres Ohr, sondern ein innenliegendes akustisches Organ, das sogenannte Labyrinth, das jeweils seitlich am Kopf hinter den Augen liegt. Das Innenohr lässt sich in den oberen Teil, der zur Orientierung im Raum (Wasser) dient und somit als Gleichgewichtssinn fungiert und den unteren Teil zur Wahrnehmung von Tönen (Gehörsinn) unterteilen (MUUS & DAHLSTRÖM 1993) (Abb. 2-28).

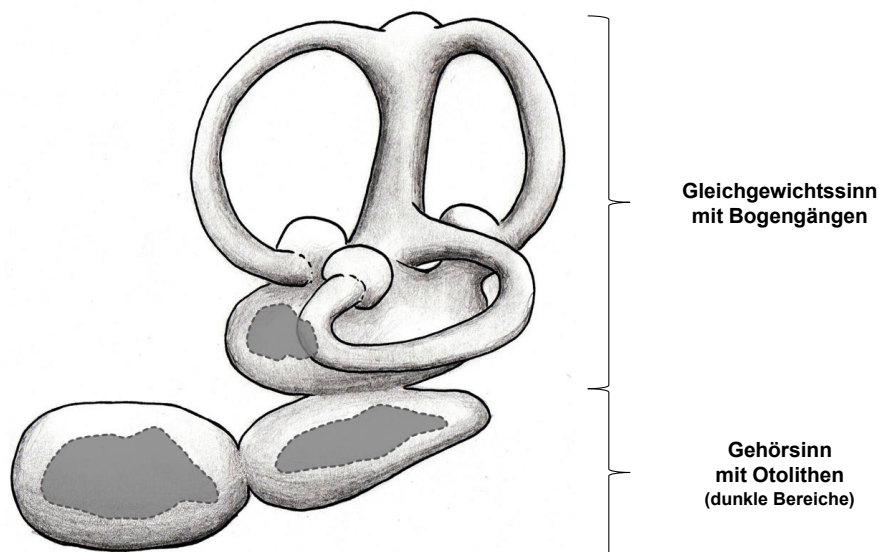


Abb. 2-28: Ohrlabyrinth eines Fisches (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER)

Der obere Teil des Innenohres (Gleichgewichtssinn) besteht aus drei Bogengängen, die mit Sinneszellen ausgekleidet sind und eine Flüssigkeit beinhalten. Die Bogengänge erweitern sich an ihrer Basis zu einer Kammer (HAMMER et al. 2010), wo sich ein Gehörsteinchen, der sogenannte Otolith befindet. Bei Bewegung des Fisches üben die Otolithen Druck aus, der sich auf die Flüssigkeit in den Bogengängen überträgt und über die Sinneszellen wahrgenommen wird. So kann sich der Fisch im Wasser in drei Dimensionen orientieren.

Der untere Teil des Innenohres (Gehörsinn) besteht aus zwei sackförmigen Gebilden mit je einem Gehörsteinchen (MUUS & DAHLSTRÖM 1993). Töne können von den Fi-

schen wahrgenommen werden, indem Schallwellen die Otolithen in Schwingung versetzen. Es gibt verschiedene Prinzipien des Hörens bei Fischen. Je nach Prinzip können die Fische in „Generalisten“ und „Spezialisten“ eingeteilt werden (RÜTER 2013). Während Generalisten, wie Bachforellen oder andere Salmoniden, die Otolithen und deren Trägheit nutzen, besitzen Spezialisten, wie eine Vielzahl der Karpfenartigen, Schmerlen oder Welse einen zusätzlichen Schallwandler, den sogenannten Weber'schen Apparat. Dieser ermöglicht die Wahrnehmung höherer Schallfrequenzen. Hier werden Schwingungen der Schwimmblase über vier zusätzliche Gehörknöchelchen, die Weber'schen Knöchelchen, auf das Innenohr übertragen. Ein weiteres Prinzip zur Verbesserung des Hörvermögens stellt die Verlängerung der Schwimmblase dar. Die gasgefüllte Blase fungiert, ähnlich wie der Weber'sche Apparat, als Schallwandler und überträgt die Schallwellen auf das Innenohr. Dieses Prinzip lässt sich beispielsweise bei Vertretern der Clupeiden (Heringe) und der Mormyriden (Nilhechte) finden (MUUS & DAHLSTRÖM 1993).

Einige Fische sind sogar in der Lage, Infraschallwellen ( $< 16$  Hz) wahrzunehmen (z. B. *Salmo salar*, *Anguilla anguilla*, HILDEBRANDT et al. 2015).

Bei ethohydraulischen Versuchen sind daher Störgeräusche und Lärm (z. B. Baulärm) zwingend zu vermeiden.

### **Geruchssinn**

Der Geruchssinn ist bei Fischen von besonderer Bedeutung für die Suche nach Nahrung oder das Erkennen von Feinden und Artgenossen. Bei einigen Fischarten ist der Geruchssinn auch für das Auffinden des Laichgebietes von zentraler Bedeutung, hier sind wiederum der Lachs sowie der Aal als Beispiele zu nennen (KAESTNER 1991, HILDEBRANDT et al. 2015). Fische besitzen ein paariges Geruchsorgan. Eine Ausnahme bilden die Neunaugen, die eine unpaarige Riechgrube besitzen (HEINTGES 2016).

Anders als bei Säugetieren, besitzen die vom Wasser durchströmten Riechgruben der Fische keine Verbindung zum Mund- bzw. Rachenraum. In den Riechgruben befinden sich Riechfalten, sogenannte Riechepithelien, die durch Faltung eine stark vergrößerte Oberfläche haben (MUUS & DAHLSTRÖM 1993). Über eine Epithelfalte wird die Riechgrube in eine Eintritts- und eine Austrittsöffnung geteilt (Abb. 2-29).





Abb. 2-29: Detailaufnahme der Nasenöffnung mit Eintritts- und Austrittsöffnung einer Nase (*Chondrostoma nasus* L.) mit Laichausschlag (Bild: BUGEFI)

Abb. 2-30 zeigt eine schematische Darstellung der Riechgrube mit Riechepithel.

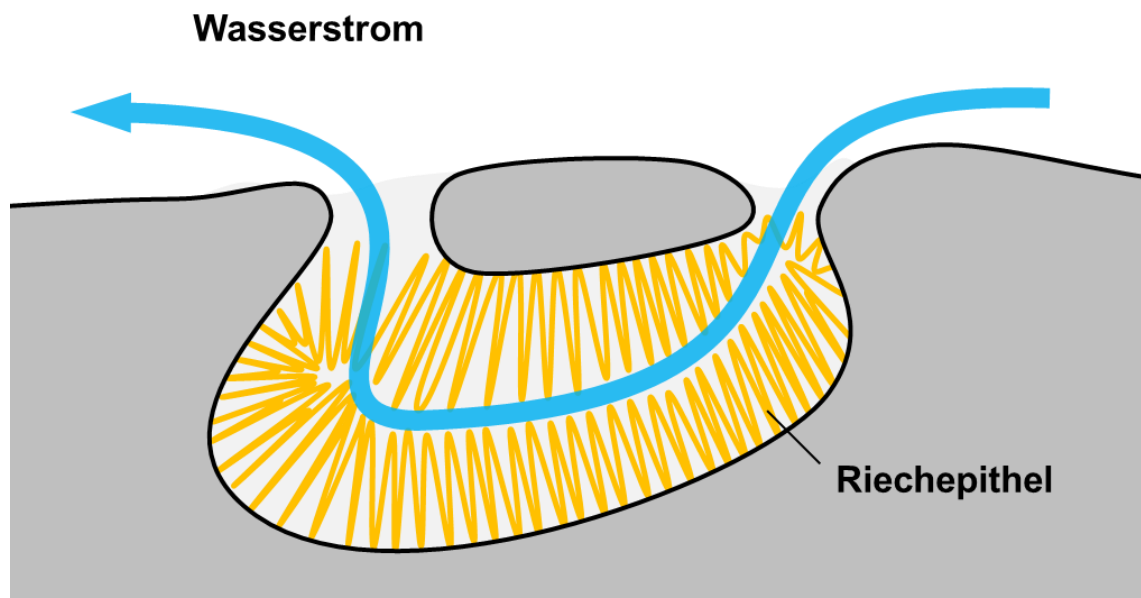


Abb. 2-30: Schematische Darstellung der Riechgrube eines Fisches mit Riechepithel (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER)

Wie oben bereits erwähnt, ist der Geruchssinn bei diadromen Fischarten besonders gut ausgeprägt. Das Geruchsvermögen des Aals ist dabei mit dem von Hunden zu vergleichen (TEICHMANN 1959). So können die Tiere Rosenöl in einer Verdünnung von 1: 2,9 Trillionen noch wahrnehmen (MUUS & DAHLSTRÖM 1993). Nachgewiesenerweise werden junge Lachse auf den Geruch ihrer Heimatgewässer geprägt (HILDEBRANDT et al. 2015). In Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass Lachse mit experimentell deaktiviertem Geruchssinn (Verstopfen der Riechgruben) ihren Heimatfluss nicht wiederfinden und in andere Gewässer aufwandern (HILDEBRANDT et al. 2015). Ein weiteres Beispiel liefert die Elritze (*Phoxinus phoxinus* L.). Sobald Elritzen den Geruch eines Hechtes wahrnehmen, fliehen sie oder lassen sich zu Boden sinken (HILDEBRANDT et al. 2015). Die Haut von Elritzen enthält darüber hinaus bestimmte Stoffe, die bei einer Verletzung abgegeben werden und bei Artgenossen und anderen Arten eine Fluchtreaktion auslösen (ADAM & LEHMANN 2011).

Da auch zwischen Raubfischen und potentieller Beute eine artspezifische olfaktorische Wahrnehmung besteht, muss im Rahmen ethohydraulischer Untersuchungen unbedingt die Zusammensetzung der Versuchsgruppen beachtet werden (vgl. Kap. 4.1.2.2).

Im Falle von Blankaalen<sup>15</sup> ist man bisher davon ausgegangen, dass die bei Probanden dieser Art beobachtete eingeschränkte Aktivität in ethohydraulischen Versuchen auf Unterschiede in der Wassertemperatur von natürlicher und Versuchsumgebung zurückzuführen ist (vgl. EICKERLING 2018). Angesichts der oben beschriebenen Relevanz des Geruchssinns, ist es jedoch auch denkbar, dass die Tiere in den Tests aufgrund eines fehlenden olfaktorischen Triggers keine ausgeprägte Abwanderungsmotivation zeigen.

### **Geschmackssinn**

Der Geschmackssinn der Fische ist extrem gut ausgebildet (HILDEBRANDT et al. 2015) und dient unter anderem als Unterstützung des Geruchssinns bei der Nahrungssuche. Die Wahrnehmung findet hier über Geschmacksknospen statt, die sich über den ganzen Körper verteilt finden; vermehrt kommen sie jedoch im Bereich des Kopfes, im Mundraum, den Lippen und an den Barteln vor (Abb. 2-31). Für tagaktive Räuber, die ihre Beute primär über das Seitenliniensystem und die Augen aufspüren, spielt der Geschmackssinn eher eine untergeordnete Rolle. Besonders ausgeprägt ist der gustatorische Sinn hingegen bei vielen Friedfischen und dem Aal (HEINTGES 2016). Der Geschmackssinn der Fische spielt für ethohydraulische Untersuchungen eine untergeordnete Rolle und wird hier daher nicht weiter berücksichtigt.

---

<sup>15</sup> Als Blankaal werden die flussabwärtswandernden Aale bezeichnet, die zur Reproduktion vom Süßwasser ins Meer (Sargassosee) schwimmen.



Abb. 2-31: Barteln einer Barbe (*Barbus barbus* L.) (Bild: BUGEFI)

### 3 Erarbeitung eines ethohydraulischen Verfahrenskataloges: Grundlegende Untersuchungen

Bislang existiert keine standardisierte Vorgehensweise für die Durchführung ethohydraulischer Untersuchungen, nach der eine statistische Auswertung zählbarer Ereignisse möglich wäre. Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Erarbeitung eines ethohydraulischen Verfahrenskataloges.

Wesentliche Grundlagen zur Etablierung eines Versuchsstandards wurden bereits von ADAM & LEHMANN (2011) erarbeitet. Im Zuge fortlaufender Experimente konnten weiterführende Erkenntnisse gewonnen werden, die eine Standardisierung ethohydraulischer Versuche sowie die statistische Auswertung der Daten vorantreiben. Hier sei beispielhaft die automatisierte Datenaufnahme über eine speziell für ethohydraulische Experimente programmierte App zu nennen (BÖCKMANN et al. 2018b).

Die Grundlage für die Erarbeitung einer standardisierten Vorgehensweise bei ethohydraulischen Versuchen im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit bilden insbesondere jene Erkenntnisse, die als Projektarbeiten vom Büro für Umweltplanung, Gewässermanagement und Fischerei, Bielefeld (im Folgenden: „BUGeFi“) geplant, durchgeführt und bewertet wurden. Diese Untersuchungen werden im weiteren Verlauf der Arbeit als „eigene“ Projektarbeiten zitiert, da die jeweiligen Ergebnisse von der Autorin selbst gewonnen wurden. Die Entwicklung der Vorgehensweise ist dabei unabhängig von den Ergebnisbewertungen der jeweiligen Projekte, da es sich bei der vorliegenden Forschungsarbeit um eine Methodenentwicklung handelt, deren Zielsetzung nicht mit den Forschungsfragen und Zielsetzungen der hier aufgeführten Projekte gleichzusetzen ist.

Die in der vorliegenden Arbeit dokumentierte Erarbeitung eines ethohydraulischen Versuchsstandards gründet im Wesentlichen auf zwei Forschungsprojekte:

- Fischschutz hinter dem Rechen (vgl. Kap. 3.1) sowie
- Schaffung der Fischdurchgängigkeit am Ruhr-Wehr Baldeney, Essen, kurz Baldeney-Projekt (vgl. Kap. 3.2)

Um das Verhalten der Fische im Labor zu beschreiben und vor dem jeweiligen biologischen Hintergrund zu interpretieren, werden, neben Literaturhinweisen auch eigene Beobachtungen miteinbezogen, die im Rahmen von Freilanduntersuchungen gewonnen wurden. Im Wesentlichen stammen die Erkenntnisse dabei aus folgenden Freilanduntersuchungen (vgl. Kap. 3.3):

- Untersuchungen von Fischwanderungen zur Erarbeitung eines Echtzeitwarnsystems an Wasserkraftanlagen (kurz: EtWas)
- Entwicklung eines Aalabstiegssystems mittels Impulsströmung (AFI-System) am Kraftwerk „Letzter Heller/Werrawerk“

Die Erkenntnisse aus den genannten Untersuchungen wurden im Rahmen des Planungsprozesses zum Forschungsprojekt „Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechenanlagen an Wasserkraftanlagen (OVeR)“ (vgl. BÖCKMANN et al. 2018a) berücksichtigt und angewendet. Die Datenerhebungen des Forschungsprojek-



tes bilden die Grundlage der vorliegenden Dissertation zur Erarbeitung einer standardisierten Vorgehensweise ethohydraulischer Untersuchungen. Weitere Aspekte, wie eine automatisierte statistische Auswertung der zählbaren Daten und die Berechnung der Anzahl notwendiger Probanden im Rahmen der Versuchsplanung, wurden ebenfalls auf der Grundlage der Daten des OVeR-Projektes neu bzw. weiter entwickelt.

Im Folgenden werden die o. g. Forschungsprojekte kurz vorgestellt.

### **3.1 Forschungsprojekt „Fischschutz hinter dem Rechen“ (2011-2012)**

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Ethohydraulische Untersuchungen zum Fischschutz an Wasserkraftanlagen“ (im Folgenden: „Fischschutz hinter dem Rechen“) wurden das Verhalten von Jung- und Kleinfischen sowie daraus abgeleitete mögliche Schutzeinrichtungen im Bereich zwischen der Rechenanlage und dem Turbinenleitapparat bei Wasserkraftanlagen im Labor untersucht (KIT & BUGeFi 2012).

Das Projekt wurde vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT) in Zusammenarbeit mit BUGeFi in den Jahren 2011 bis 2012 bearbeitet. Auftraggeber des Projektes war das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV NRW). Fachlich begleitet wurden die Untersuchungen vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV NRW).

Den Laboruntersuchungen waren Untersuchungen im Freiland vorausgegangen. Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen an einer Kleinwasserkraftanlage mit Kaplan turbine und geringer Fallhöhe konnte beobachtet werden (KÜHLMANN 2009), dass die Fische, die in die Wasserkraftanlage eingebracht wurden, eine Turbinenpassage vermieden, indem sie anlagenbedingte strömungsberuhigte Bereiche aufsuchten und dort verweilten (HOFFMANN et al. 2010, BUGeFi 2010). Diese Beobachtungen warfen die Frage auf, ob es möglich ist, Jung- bzw. Kleinfische, welche durch eine Rechenanlage gelangen können, durch geeignete Maßnahmen vor einer Turbinenpassage zu schützen. Durch ethohydraulische Laborversuche sollten dabei Schutzeinrichtungen für Jung- und Kleinfische entwickelt werden, die das natürliche Verhalten von Fischen derart nutzen, dass die Tiere die Einrichtungen selbstgesteuert auffinden und entlang sog. Evakuierungskorridore unbeschadet in das Unterwasser geleitet werden.

Um die kontinuierliche Strömungsbeschleunigung der Turbinenzulauf-Situation einer realen Kleinwasserkraftanlage situativ ähnlich auf das Labor zu übertragen, wurde eine einseitige Einengung des Strömungsquerschnittes in die Versuchsrinne eingebaut (Abb. 3-1). Hinter dem eigentlichen Rechen wurde eine einheitliche Strömungssituation mit gleichbleibender Querschnittsgeometrie nachgebildet.

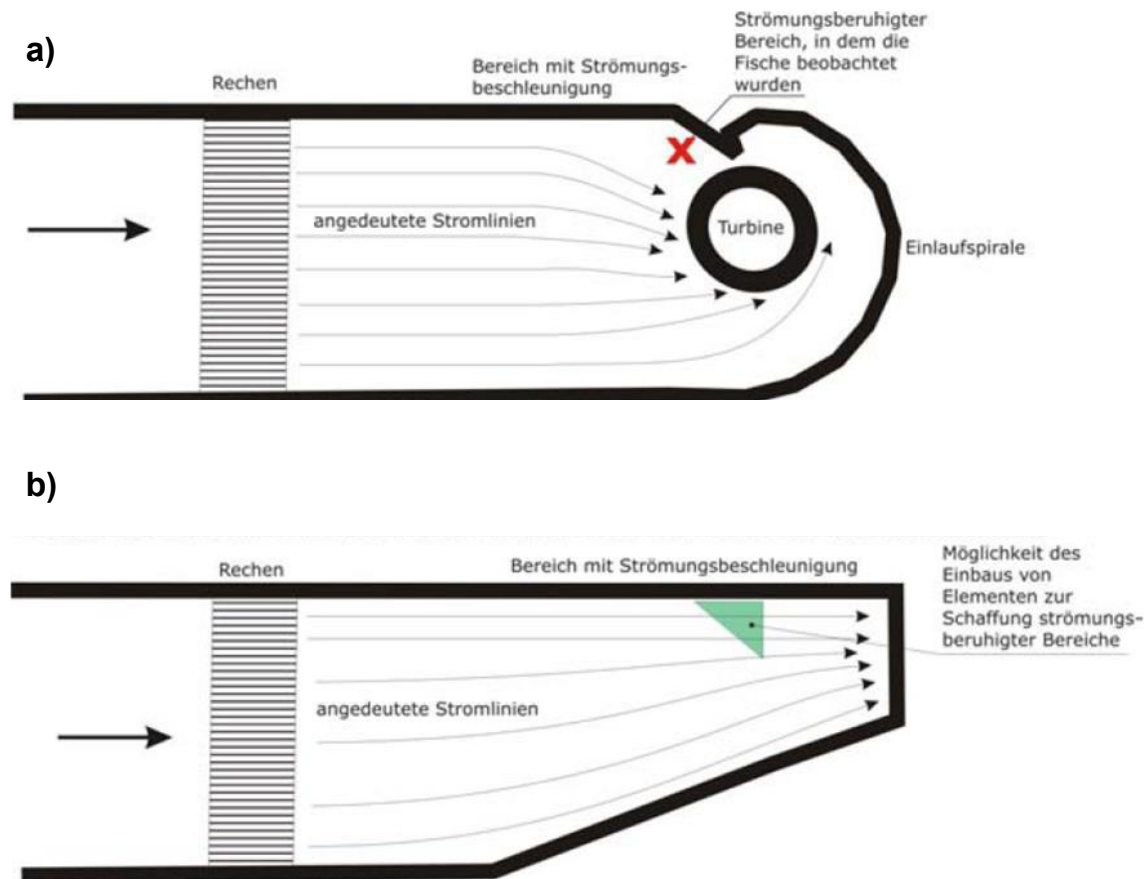


Abb. 3-1: Vergleich der Strömungsverhältnisse a) in der realen Wasserkraftanlage und b) des Modells im ethohydraulischen Versuchsaufbau zur Herstellung der situativen Ähnlichkeit (Quelle: KIT & BUGEFi 2012, verändert)

Die ethohydraulischen Tests verliefen in vier aufeinander aufbauenden Untersuchungsstufen.

1) Das Ziel der Vorversuche war die Herstellung einer situativen Ähnlichkeit zwischen der realen Wasserkraftanlage und dem Labor. Dabei wurden drei verschiedene hydraulische Setups, die etwa die Situation im Teillast- oder Volllastbetrieb der Turbine darstellten, definiert. Weiter wurde im Rahmen der Vorversuche der Versuchsstand validiert sowie der Versuchsablauf (Handling der Fische, Datenaufnahme etc.) optimiert.

2) In Referenzversuchen wurde das Verhalten verschiedener Fischarten und -altersstadien im Versuchsstand beobachtet und dokumentiert. Dabei konnten im Wesentlichen zwei Verhaltensmuster identifiziert werden: Beim sog. *Sondieren* ließen sich die Fische rheotaktisch positiv ausgerichtet zunächst mit der Strömung in Richtung Engstelle driften. Sobald sie einen Punkt erreichten, an dem die Strömungsbeschleunigung aufgrund der Querschnittseinengung stark zunahm, beendeten die Fische die Sondierung. Durch Sprinten entgegen der Strömung schwammen sie wieder zurück in strömungsberuhigte Bereiche des Oberwassers. Demnach bestand - artspezifisch variabel - eine hydraulische Verhaltensbarriere bei hohen Strömungsbeschleunigungen auf

kurzer Distanz (Umkehrpunkt). Getestet wurden Strömungsbeschleunigungen mit Maximalwerten zwischen 1 und 2 m/s in Engstellen. Darüber hinaus konnte im Rahmen der Untersuchungen das *Verharren* der Fische in bestimmten strömungsberuhigten Bereichen beobachtet werden, woraus Hinweise auf mögliche Positionen für ein Evakuierungssystem resultierten.

3) In den Hauptversuchen wurden verschiedene Einbauten untersucht, die den Fischen eine Schutzzone mit moderaten Strömungsverhältnissen bieten sollten. Es wurden fünf verschiedene Varianten getestet, deren Einbau die Anströmverhältnisse der Turbine nicht negativ beeinflussen durften. Es wurde eine Struktur erarbeitet, die sowohl boden- als auch freiwasserorientierten Fischarten eine Schutzzone vor der Strömungsbeschleunigung bieten konnte.

4) Im Rahmen der Evakuierungsversuche wurde den Fischen die Möglichkeit gegeben, aus der zuvor entwickelten Schutzzone in sog. Evakuierungskorridore zu schwimmen, die in einem weiteren Schritt über ein Bypass-System den Weg ins Unterwasser der Wasserkraftanlage ermöglichen sollten. Dazu wurden von der Schutzstruktur abgehend verschiedene Öffnungen zum Evakuierungskorridor und verschiedene Signaturen von Leitströmungen untersucht.

Das Produkt der beschriebenen ethohydraulischen Untersuchungen war eine Evakuierungsstruktur, die hohe Ableitungsraten der getesteten Fischarten ermöglichte.

Für die Untersuchungen wurden insgesamt ca. 1.200 Fische aus 15 Fischarten verschiedener Körperlängenklassen (kleinste Fischart: Elritze mit 5 cm; längste Fischart: Aal mit 60 cm Körperlänge) verwendet.

Die Untersuchungen folgten der klassischen Vorgehensweise von ADAM & LEHMANN (2011). Im Vordergrund der Untersuchungen stand dabei die Beobachtung hydraulisch-taktiler Verhaltensweisen, wobei die beiden Verhaltensmuster *Sondieren der hydraulischen Verhaltensbarriere* und *Verharren* beobachtet werden konnten. Eine Auswertung zählbarer Ereignisse wurde im Rahmen der Untersuchungen lediglich auf deskriptiver Ebene durchgeführt.

Eine kurze Zusammenfassung der Laboruntersuchungen des Projektes in Form eines Steckbriefes findet sich im Anhang (vgl. Kap. A.1, Steckbrief 1).

### **3.2 Forschungsprojekt „Schaffung der Fischdurchgängigkeit am Ruhr-Wehr Baldeney, Essen“, kurz: Baldeney-Projekt (2012-2015)**

Wie bereits einleitend beschrieben, ist in der EU-WRRL die Herstellung der Durchgängigkeit der Fließgewässer als ein indirektes Ziel definiert (vgl. Kap. 1.1 und 2.2). An der vom Ruhrverband betriebenen Flusstaustufe Baldeney in Essen, Nordrhein-Westfalen (Abb. 3-2) muss gemäß dieser Vorgabe für die Referenzfischfauna der Ruhr eine Wandermöglichkeit zwischen dem Unter- und Oberwasser geschaffen werden.

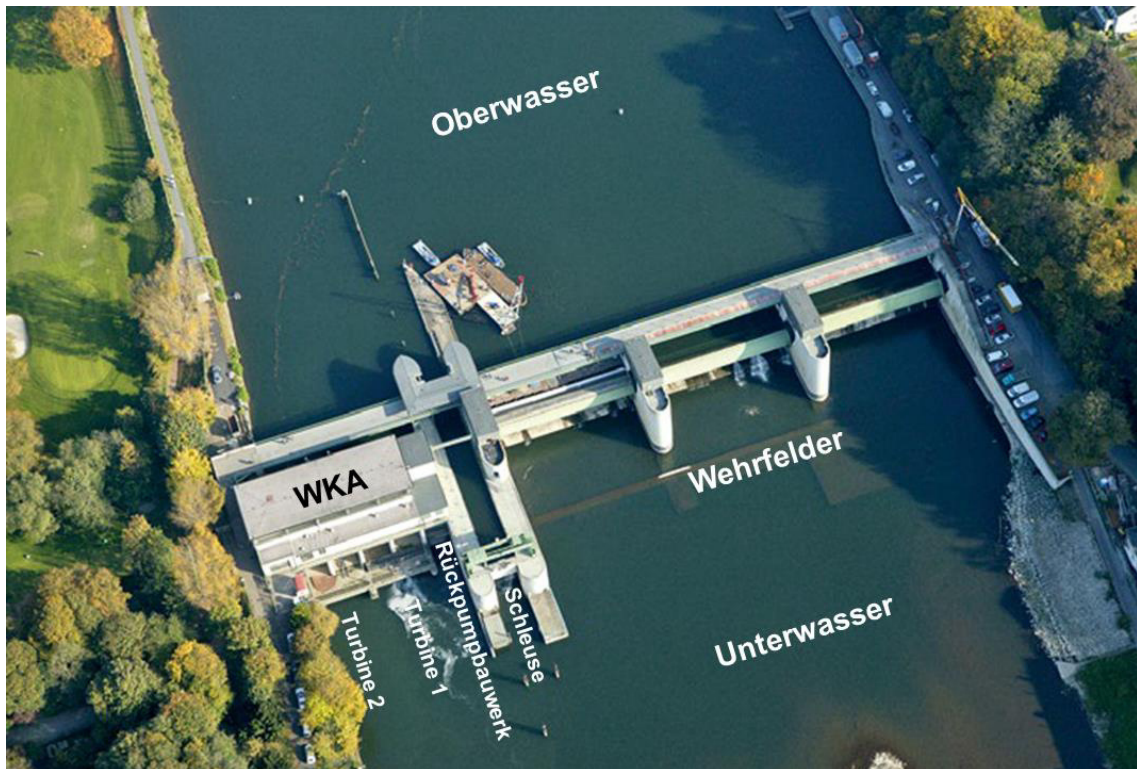


Abb. 3-2: Luftbild der Stau- und Wasserkraftanlage am Baldeneysee in Essen (Quelle: KÜHLMANN et al. 2015, verändert)

Ein erstes Konzept zur Herstellung der aufwärtsgerichteten Durchgängigkeit wurde in den Jahren 2010/2011 im Auftrag des Ruhrverbandes erarbeitet (FLOECKSMÜHLE 2011). Aufgrund des großen Wasserspiegelunterschieds (8,7 m) und dem für konventionelle Aufstiegsanlagen hohen Bedarf an Fläche, der in diesem Fall nicht gedeckt werden kann, konnte zunächst keine Lösung gefunden werden.

Im Jahr 2012 wurde die Lösungssuche vom Ruhrverband (Essen) in Abstimmung mit den Fachbehörden und unter Beteiligung einer interdisziplinären Arbeitsgruppe fortgeführt. Um Grundlagen für eine fundierte Lösung zur Herstellung der Durchgängigkeit zu schaffen, wurden Datenerhebungen im Freiland (Befischungen, Sonaruntersuchungen) sowie Modelluntersuchungen durchgeführt, die dazu dienen sollten, Aussagen über die klein- und großräumige Auffindbarkeit des möglichen Einstiegsbereiches in die Fischaufstiegsanlage zu treffen. Auf Basis der so gewonnenen Erkenntnisse wurde als Möglichkeit zur Herstellung der aufwärtsgerichteten Durchgängigkeit ein neuartiger Fischlift, der sog. „Hydro-Fischlift“ vorgeschlagen (ROTH & BAUMANN 2015). Gemäß den geltenden Vorgaben in Nordrhein-Westfalen muss der Fischaufstieg an mindestens 300 Tagen pro Jahr gewährleistet sein. Diese Kontinuität wird an der Staustufe Baldeney mittels eines alternierenden Betriebs zweier Fischlifte, die an eine gemeinsame Vorkammer angeschlossen sind, realisiert (Abb. 3-3).

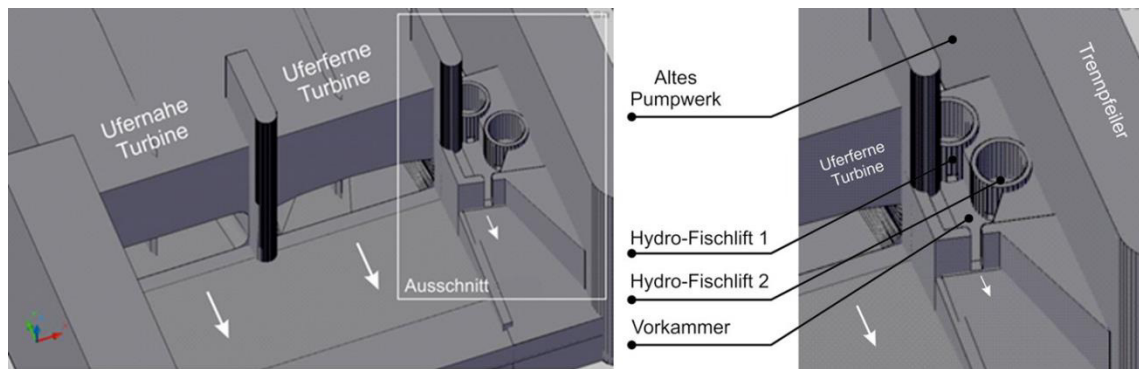


Abb. 3-3: Schematischer Überblick über die Anordnung der beiden Fischlifte in der Vorkammer im Bereich des ehemaligen Rückpumpbauwerkes der Staustufe Baldeney (Quelle: LEHMANN & KÜHLMANN 2015, verändert)

Da es sich bei dem System gemäß der Erlasslage des Landes NRW jedoch um eine Sonderbauweise handelte (MUNLV NRW 2009a), war ein Funktionsnachweis im Rahmen ethohydraulischer Tests notwendig (MUNLV NRW 2005).

Die ethohydraulischen Untersuchungen wurden im Jahr 2014 vom BUGEFi im Auftrag des Ruhrverbandes und in enger Zusammenarbeit mit dem KIT durchgeführt. Aufbauend auf den numerischen und physikalischen Modellen wurde der ethohydraulische Versuchsstand im Wasserbaulabor des KIT gebaut.

Das Hauptziel des Projektes war der Nachweis, dass die für die Ruhr relevanten Fischarten die Vorkammer passieren, den Einstieg in den Fischlift finden, in diesen einschwimmen und, nach einer simulierten Transferphase in das Oberwasser, wieder aus dem Lift ausschwimmen. Weiter wurde eine zusätzliche Wasserdotation in der Vorkammer untersucht. Diese zusätzliche Wasserabgabe sollte zu einer Verstärkung der Leitströmung aus der Vorkammer heraus und somit zu einer verbesserten großräumigen Auffindbarkeit beitragen.

Insgesamt wurden ca. 800 Individuen aus 15 verschiedenen Fischarten getestet. Alle getesteten Arten haben dabei die Vorkammer passiert, sind in den Fischlift eingeschwommen und nach einer simulierten Liftphase in das Oberwasser ausgeschwommen. Als angemessene Leitströmung aus dem Fischlift hinaus konnte eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s erarbeitet werden (HOFFMANN & BÖCKMANN 2015).

2015 wurden die Ergebnisse in der projektbegleitenden Arbeitsgruppe vorgestellt und von den beteiligten Institutionen, Planungsbüros und Universitäten dem Auftraggeber (Ruhrverband) die Empfehlung gegeben, ein Fischliftsystem an der Stauanlage in Baldeney zur Herstellung der aufwärtsgerichteten Durchgängigkeit zu bauen.

Momentan befindet sich das Fischliftsystem am Baldeneysee im Bau und wird voraussichtlich im Frühjahr 2020 fertig gestellt ([www.ruhrverband.de/fischlift/infopoint-fischlift-system/](http://www.ruhrverband.de/fischlift/infopoint-fischlift-system/)). Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit sind eine anschließende Einstellungsphase und ein Monitoring geplant.

Eine kurze Zusammenfassung der Laboruntersuchungen des Projektes in Form eines Steckbriefes findet sich im Anhang (vgl. Kap. A.2, Steckbrief 2).

### **3.3 Verschiedene Freilanduntersuchungen**

#### Echtzeitwarnsystem (EtWas)

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Untersuchungen von Fischwanderungen zur Erarbeitung eines Echtzeitwarnsystems an Wasserkraftanlagen“ – kurz: „EtWas“ wurde von der RWE Innogy GmbH beauftragt und anteilig vom Land NRW über die Bezirksregierung Düsseldorf und dem Ruhrverband finanziert (BUGEFi et al. 2014).

Im Rahmen des Projektes wurde ein Warnsystem entwickelt, das auf der Grundlage von in Echtzeit detektierten Fischkontakten mittels DIDSON-Sonar unter Einbezug bestimmter abiotischer Faktoren basiert. Mithilfe des Warnsystems können bestimmte anlagenspezifische Maßnahmen (wie z. B. Wehrüberfall und höhere Beaufschlagung der wehrnahen Turbine zur Herstellung einer Lockströmung) innerhalb realer Aktivitätszeiträume zum Schutz von abwandernden Fischen an Wasserkraftanlagen eingeleitet werden (HOFFMANN & KLINGER 2012).

Die Freilanduntersuchungen mittels Sonartechnologie fanden von Frühjahr bis Winter 2012 statt. Neben der Entwicklung eines Warnsystems konnten weitere Erkenntnisse in Bezug auf Aktivitätsmuster abwandernder Fische bzw. Fischschwärme an Wehr- und Wasserkraftanlagen gewonnen werden.

Das Projekt wurde vom BUGeFi in Zusammenarbeit mit der LFV Hydroakustik GmbH durchgeführt. Die Auswertung der Daten und deren Implementierung in eine Softwareanwendung wurde vom Lehrstuhl für Statistik der Ludwig-Maximilians-Universität München und dem Büro jTi-soft bearbeitet.

#### Entwicklung eines Aalabstiegssystems

Auftraggeber des Projektes „Entwicklung eines Aalabstiegssystems mittels Impulsströmung (AFI-System) am Kraftwerk „Letzter Heller/Werrawerk“ war die Firma Statkraft Markets GmbH. Hier wurden Ende 2013 erste Sonaruntersuchungen vom BUGeFi durchgeführt, die eine geeignete Positionierung eines möglichen Bypasses bzw. Abstiegssystems an der Wasserkraftanlage eruieren sollten. Strömungsmessungen vor dem Turbineneinlauf wirkten dabei unterstützend. Anhand der Untersuchungen konnte eine geeignete Position für ein Abstiegssystem ermittelt werden. Bei dem Abstiegssystem handelte es sich um ein Modell mit verschiedenen Einstiegsöffnungen, die mit unterschiedlichen Leit- aber auch Saugströmungen beaufschlagt werden konnten. Entgegen zuvor gewonnener Erkenntnisse aus ethohydraulischen Laboruntersuchungen zeigten Aale in dieser Freilanduntersuchung eine höhere Affinität zur dargebotenen Saugströmung (vgl. KIT & BUGEFi 2012).

### 3.4 Pilotprojekt „Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechenanlagen an Wasserkraftanlagen (OVer)“ (2015-2018)

#### OVer als Pilotprojekt

Im Modul II des OVer-Projekts wurden erstmalig explizit die für eine valide statistische Auswertung erforderlichen Grundlagen (s. Kap. 4) berücksichtigt. Unter der Zielsetzung, in zukünftigen ethohydraulischen Untersuchungen eine standardisierte Vorgehensweise zu etablieren, ist OVer somit als Pilotprojekt anzusehen. Unabhängig von den Ergebnissen und Bewertungen des eigentlichen Projektes bildet es eine wesentliche Grundlage für die vorliegende Arbeit.

#### Allgemeine Projektbeschreibung

Während die aufwärtsgerichtete Durchgängigkeit seit dem Jahr 1996 durch den Bau funktionsfähiger Fischaufstiegsanlagen technisch gewährleistet werden kann (vgl. DWA 2014, VDFF 2018), ist die Bemessung und Gestaltung von Fischabstiegsanlagen noch mit vielen offenen Fragen behaftet. Dies gilt insbesondere für große Bestandsanlagen mit Durchflusswassermengen von mehr als 30 m<sup>3</sup>/s im Falle von Vertikalrechen bzw. von mehr als 50 m<sup>3</sup>/s für Horizontalrechen (UBA 2015, VDFF 2018).

Zur Erarbeitung neuer Erkenntnisse hinsichtlich der Gestaltung und Bemessung von Rechen- und Bypass-Systemen zum Fischabstieg an Bestandswasserkraftanlagen wurde im Auftrag der innogy SE ein Forschungsprojekt zum Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechenanlagen (im Folgenden: OVer-Projekt) durchgeführt.

Das Projekt wurde anteilig vom Land Nordrhein-Westfalen (Bezirksregierung Köln, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW) gefördert. Der Projektzeitraum lag zwischen Januar 2015 und Oktober 2018. Die Bearbeitung erfolgte durch das BUGeFi und das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen, University.

Schwerpunkt des Projektes bildeten zwei Untersuchungsmodule. Im Fokus des ersten Moduls lag die Untersuchung der Wirksamkeit eines Rechens in Abhängigkeit der Zusammenhänge zwischen dem artspezifischen Fischverhalten und der Anströmgeschwindigkeit sowie verschiedenen Gestaltungsparametern (Stababstand, Neigungswinkel).

In Nordrhein-Westfalen gibt es auf Grundlage der Erlasslage feste Vorgaben für die Gestaltung von Rechenanlagen zum Fischschutz. Dazu wurden die Fließgewässer NRWs in sog. Zielartenkulissen eingeteilt (MUNLV NRW 2009b, MKULNV NRW 2015a). Man unterscheidet dabei zwischen Zielartengewässern für den Lachs und solchen für den Aal, die in entsprechenden Karten dargestellt sind (MKULNV NRW 2015b). In Zielartengewässern für den Aal gilt ein Rechenstababstand von 15 mm, für den Lachs gelten 10 mm als Vorgabe (vgl. LFischVO 2018). In allen anderen Gewässern ist ein Stababstand von 20 mm zu gewährleisten (vgl. MUNLV NRW 2009b, MKULNV NRW 2014). Diese Vorgaben beziehen sich auf Vertikalrechen. Im Falle von Horizontalrechen gilt für Lachssmolts ein Stababstand von 12 mm als für den Fisch-



schutz ausreichend (MKULNV NRW 2015). Die Anströmgeschwindigkeit vor dem Rechen darf einen Wert von 0,5 m/s nicht überschreiten (MUNLV NRW 2009a).

Ziel des Untersuchungsmoduls I war die Erarbeitung von Erkenntnissen zur Dimensionierung von Rechanlagen vor großen bestehenden Wasserkraftanlagen. Darüber hinaus sollten Hinweise für eine mögliche Positionierung und Gestaltung eines Bypass-Systems erarbeitet werden.

Ein solches Bypass-System bildete den Schwerpunkt der Untersuchungen im Rahmen des Projektmoduls II. Es handelte sich hierbei um einen seitlichen Bypass. In den Untersuchungen wurde ein vertikal geneigter (70°) Rechen getestet. Der Einfluss zweier Strömungsgeschwindigkeiten (0,3 m/s; 0,5 m/s) im Bypasseingang auf die Effizienz des potentiellen Abstiegswegs wurde getestet. Die Effekte der unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten wurden bei drei verschiedenen Stababständen (20, 40, 60 mm) untersucht. Die Anströmgeschwindigkeit am Rechen lag gemäß der nordrhein-westfälischen Erlasslage über alle Untersuchungen hinweg bei 0,5 m/s (MUNLV NRW 2009a). Die Untersuchungen wurden von Mai bis Anfang Juni 2017 mit Lachssmolts (8 - 16 cm), von Oktober bis November 2017 mit Rotaugen (12 - 21 cm) und von Dezember 2017 bis Januar 2018 mit Blankaaalen (40 - 100 cm) durchgeführt.

Abb. 3-4 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die wesentlichen Inhalte und Ziele der beiden Untersuchungsmodule.

Modul	Beschreibung	Ziel
OVeR I	Einfluss verschiedener Rechenparameter auf das Verhalten von Fischen	Erarbeitung einer geeigneten Bypass-Position für bestehende WKA
OVeR II	Untersuchung eines Bypass-Systems (seitlicher Bypass)	Erarbeitung einer geeigneten Bypassgeometrie als mögliche Fischabstiegsanlage für bestehende WKA

Abb. 3-4: Zusammenfassung der Untersuchungsmodule I und II des OVeR-Projektes

Im Zwischenbericht 1 finden sich die Konzeptionierung der Untersuchungen sowie die Ergebnisse der Vorversuche für das Untersuchungsmodul I (KLOPRIES et al. 2015). In detaillierter Form finden sich die Ergebnisse des Untersuchungsmoduls I im Zwischenbericht 2 (KLOPRIES et al. 2017b) sowie als Zusammenfassung in der Veröffentlichung von KLOPRIES et al. (2018). Ergebnisse des Untersuchungsmoduls II finden sich im Zwischenbericht 3 (BÖCKMANN et al. 2018b). Eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse des Forschungsprojektes findet sich im Endbericht (BÖCKMANN et al. 2018a).

Eine kurze Zusammenfassung des OVeR-Projektes findet sich im Anhang (Anhang A.3, Steckbrief 3).



## 4 Erarbeitung eines ethohydraulischen Verfahrenskataloges: OVeR als Pilotprojekt

Im OVeR-Projekt wurde das Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechenanlagen an Wasserkraftanlagen untersucht. Das Projekt gliederte sich in zwei Untersuchungsmodule. Im Rahmen des Moduls I erfolgten die Beobachtung und Bewertung des Verhaltens von verschiedenen Fischarten vor Rechen mit unterschiedlichen Gestaltungsparametern (Neigungswinkel, Anströmgeschwindigkeit, Stababstand, vgl. Kap. 3.4). Für das Projektmodul II wurde der Abstieg von Fischen über einen seitlichen Bypass im Detail untersucht.

Bei der Planung der in Modul II des OVeR-Projektes durchgeführten ethohydraulischen Tests wurden die zuvor dargestellten Grundlagen zum wissenschaftlichen Arbeiten sowie der Fisch-Physiologie (vgl. Kap. 2) und Erkenntnisse aus verschiedenen ethohydraulischen Untersuchungen (vgl. Kap. 3) angewendet. Der dabei entwickelte Verfahrenskatalog dient als Grundlage für einen guten Labor-Standard bei der Durchführung und statistischen Auswertung ethohydraulischer Untersuchungen.

In den folgenden Kapiteln wird jeweils zunächst eine Übersicht über die bisherigen Erkenntnisse aus eigenen ethohydraulischen Untersuchungen oder Literaturquellen aufgeführt. Darauf folgend wird jeweils die Anwendung dieser Grundlagen im OVeR-Projekt beschrieben. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass nicht alle zuvor genannten Grundlagen auch im OVeR-Projekt angewendet wurden, da einige Aspekte ggf. für dieses Projekt nicht von Relevanz waren.

### Fragestellungen OVeR-Projekt, Modul II

Wie in Kap. 2 beschrieben, steht im Vorfeld einer wissenschaftlichen Untersuchung die Formulierung konkreter Fragestellungen zur Klärung bestimmter Sachverhalte.

Im Fokus der Untersuchungen zum Modul II des OVeR-Projektes stand die Beantwortung der folgenden Fragestellungen (vgl. BÖCKMANN et al. 2018b):

- I. Nehmen die Fische den seitlichen Bypass als potentiellen Abstiegsweg an?
- II. Verringert sich die Erfolgsquote der Ableitung durch das Bypass-System mit zunehmendem Rechenstababstand?
- III. Gibt es einen Unterschied in Bezug auf die kleinräumige Auffindbarkeit, Akzeptanz der Bypassöffnung und die Passage der Bypassrinne für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten (0,3 m/s und 0,5 m/s) im Bypasseingang bzw. Beaufschlagungen des Bypasses?

## **4.1 Umsetzung eines Verfahrenskataloges ethohydraulisch relevanter Aspekte**

Im Folgenden wird zwischen (1) baulichen Grundlagen, die verschiedene Kriterien der Hardware (Gestaltung der Versuchsrinne) betreffen, sowie (2) verhaltensbiologischen und (3) chemisch-physikalischen Grundlagen unterschieden. Darüber hinaus wird ein (4) Überblick über die Berücksichtigung rechtlicher Grundlagen bei ethohydraulischen Untersuchungen gegeben.

### **4.1.1 Bauliche Grundlagen**

In den folgenden Abschnitten werden die ethohydraulisch relevanten baulichen Grundlagen behandelt.

#### **4.1.1.1 Ethohydraulisches Modell**

##### **4.1.1.1.1 Anzuwendende Grundlagen**

Um bei ethohydraulischen Untersuchungen eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus Laborversuchen auf das Freiland sicherzustellen, ist darauf zu achten, dass die baulichen und hydraulischen Gegebenheiten in einem möglichst großskaligen Maßstab als Ausschnittsmodell im Labor abgebildet werden (vgl. Kap. 2.2.1). Anders als im wasserbaulichen Versuchswesen, wo häufig maßstäblich verkleinerte Ähnlichkeitsmodelle eingesetzt werden, können Fische nicht maßstäblich verkleinert werden (ADAM & LEHMANN 2011).

Eine der wichtigsten Grundlagen für die Durchführung ethohydraulischer Tests bildet das Vorhandensein einer teilweise verglasten Versuchsrinne. Eine modulare Einrichtung der verschiedenen zu testenden Parameter (z. B. verschiedene Einbauten) sowie eine flexible Betriebsweise (Strömungsgeschwindigkeiten, Wasserstand etc.) sind dabei Grundvoraussetzung.

Im Jahr 2008 wurde im Theodor-Rehbock Wasserbaulabor des KIT auf der Grundlage bisheriger Erfahrungen fischbiologischer Laboreinrichtungen eine Versuchsrinne mit entsprechender Regelungs- und Messtechnik sowie einer Fisch-Hälterungsanlage eingerichtet (LEHMANN et al. 2009, ADAM & LEHMANN 2011). Um die bauliche Umsetzung der zu testenden Strukturen und Einbauten im Maßstab 1:1 zu ermöglichen, musste ein ausreichendes Raumangebot gegeben sein. Die vorhandene ethohydraulische Versuchsrinne wurde für die Untersuchungen der Forschungsprojekte „Fischschutz hinter dem Rechen“ und „Baldeney-Projekt“ mit den wesentlichen zu testenden Geometrien entsprechend umgebaut.

Neben der Notwendigkeit einer ethohydraulischen Versuchsrinne ist zur Durchführung ethohydraulischer Tests eine Reihe weiterer Aspekte zu berücksichtigen, damit die gestellten Forschungsfragen beantwortet und ergebnisbeeinflussende Artefakte bei der Datenaufnahme ausgeschlossen werden können. Diese werden in den Kapiteln 4.1.1.2 bis 4.1.1.5 beschrieben.

#### 4.1.1.1.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt

Für die ethohydraulischen Untersuchungen des OVeR-Projektes wurde im Jahr 2014 eine neue Versuchsrinne in der Wasserbauhalle des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) in Aachen errichtet.

Der Bau der Versuchsrinne erfolgte unter fachlicher Beratung durch BUGeFi. Neben der Versuchsrinne mit den entsprechenden Regelungselementen, der Steuerungs- und Messtechnik sowie den ethohydraulischen Komponenten (z. B. Fischschutzgitter, Starttor), wurde überdies eine Anlage zur Hälterung der Versuchsfische mit entsprechender Überwachungstechnik zur Sicherung der Wasserqualität angeschlossen (Abb. 4-3c). Die physikalisch-chemischen Wasserparameter (z. B. Wassertemperatur) der Versuchsrinne sind dabei synchron mit denen der Hälterungsanlage.

Die aus Fertig-Betonelementen („L-Elementen“) konstruierte ethohydraulische Versuchsrinne hat eine Gesamtlänge von 32 m und ist in verschiedene funktionelle Abschnitte unterteilt (Abb. 4-1). Die im Rahmen der OVeR-Untersuchungen genutzte Versuchsstrecke beginnt nach 14 m unterwasserseitig des Einlaufbereichs und hat eine Länge von 7 m. Der Wasserbedarf für die physikalischen Modelle wird im Wasserbaulabor der RWTH Aachen über einen Wasserkreislauf (Abb. 4-2) bedient. Mittels der vier Pumpen kann bei Vollbetrieb ein Durchfluss von 1.400 l/s erreicht werden. Im Einlaufbereich befinden sich zusätzlich Strömungsgleichrichter (Abb. 4-3a), um eine möglichst gleichmäßige Strömung zu erhalten. Um ein Einschwimmen der Versuchsfische in die Pumpen bzw. den Tiefbehälter zu verhindern, ist die Versuchsstrecke durch Fischschutzgitter aus Nylon mit einer Maschenweite von 10 mm (Engel-Netze GmbH & Co KG, Bremerhaven) abgegrenzt. Ein Starttor ermöglicht das kontrollierte Einbringen der Versuchsfische in einen Startbereich, in dem sich die Tiere zunächst an die Strömungsbedingungen gewöhnen können. Das Starttor kann seitlich aufgezo- gen werden, um ein Einschwimmen in den Versuchsbereich zu ermöglichen. Von einem abgedunkelten Beobachtungsbereich aus kann das Verhalten der Fische beobachtet werden (vgl. Kap. 4.1.1.5). Dabei ist darauf zu achten, dass der untere Rand des Beobachtungsfensters bündig mit der Sohle der Versuchsrinne abschließen muss, um einen toten Winkel zu vermeiden, in welchem Fische der Beobachtung entgehen könnten.

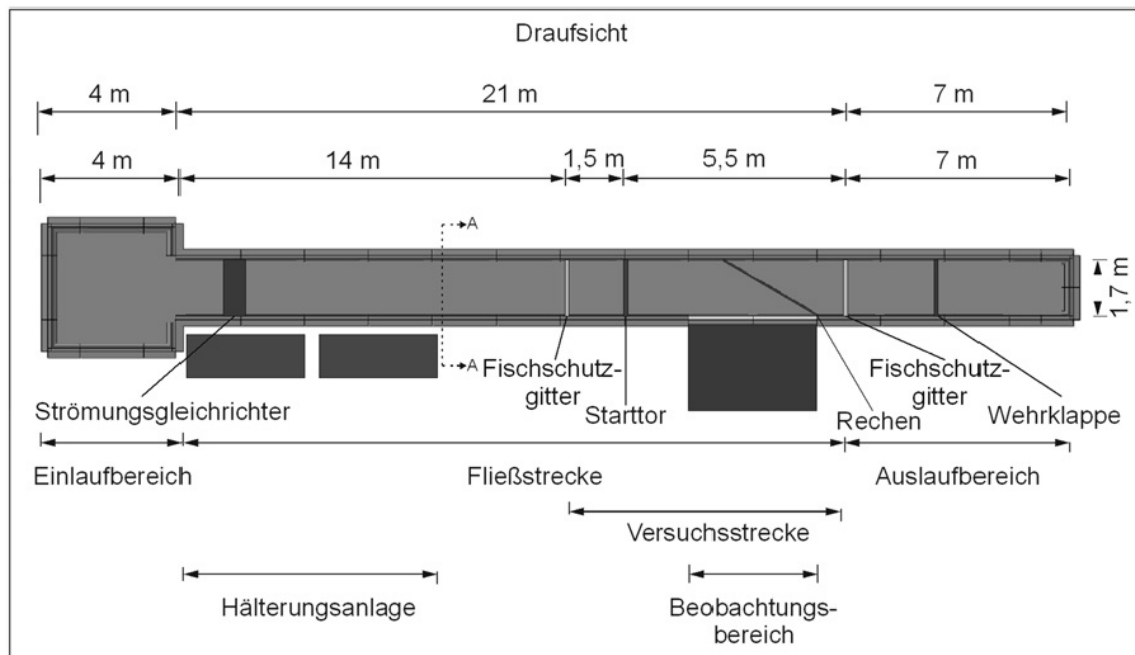


Abb. 4-1: Draufsicht auf den ethohydraulischen Versuchsstand und die Hälterungsanlage im Wasserbaulabor der RWTH Aachen mit entsprechenden Bemaßungen (Quelle: KLOPRIES et al. 2017a, verändert)

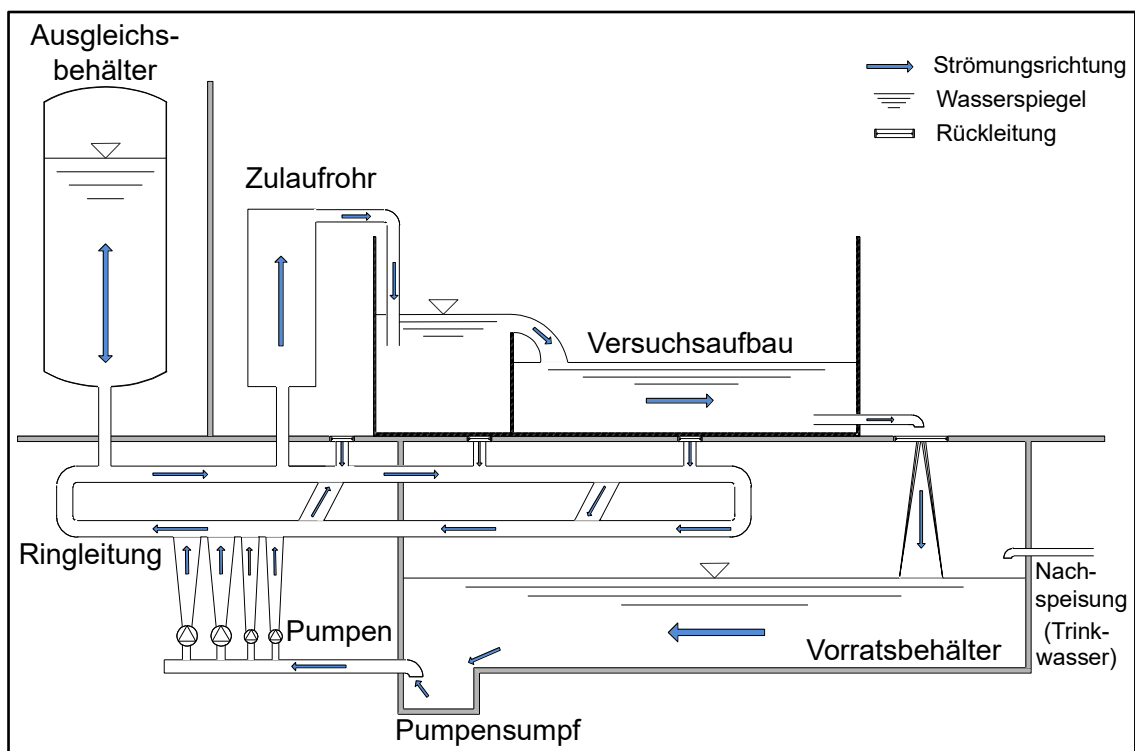


Abb. 4-2: Skizze des Wasserkreislaufs im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (Quelle: KLOPRIES et al. 2017b)



Abb. 4-3: Verschiedene Komponenten der ethohydraulischen Versuchsrinne im Wasserbaulabor der RWTH Aachen im Rahmen des OVeR-Projekts, a) Strömungsgleichrichter im Einlaufbereich, b) Blick in Strömungsrichtung auf Rechen und Bypassrinne, c) Hälterungsanlage, d) Blick in den Rohbau des seitlichen Bypasses, e) Blick aus dem Beobachtungsraum in die Versuchsrinne mit Rechen und Bypasseingang

Die Versuchsrinne wurde so konzipiert, dass sie entsprechend verschiedener Fragestellungen modifiziert werden kann. So wurde im Untersuchungsmodul II ein seitlicher Bypass angebaut und als möglicher Abstiegsweg getestet. Die 0,5 m breite Bypassrinne zweigte mit einem Winkel von  $30^\circ$  von der Hauptrinne ab und verlief dann parallel zu dieser (Abb. 4-3b, Abb. 4-4). Detailliertere Angaben zu den einzelnen Bemaßungen finden sich in BÖCKMANN et al. (2018b, 2018a).

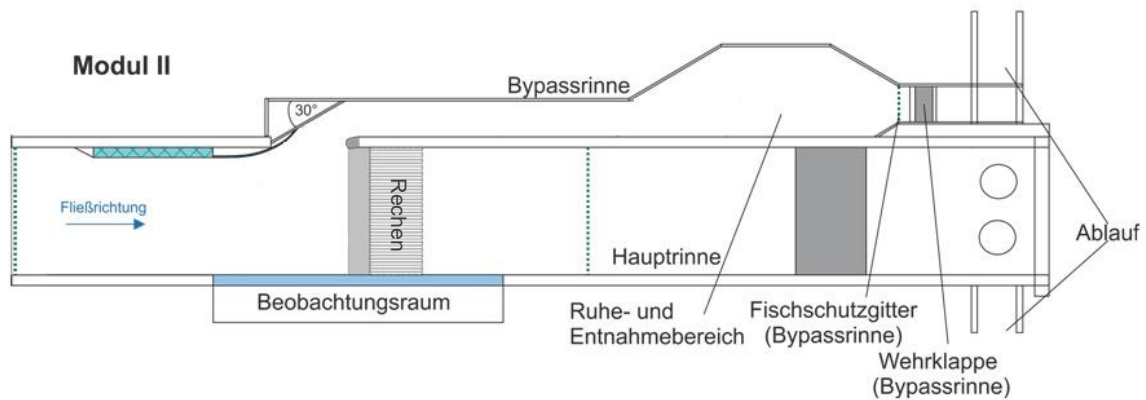


Abb. 4-4: Draufsicht auf die ethohydraulische Versuchsrinne im Wasserbaulabor der RWTH Aachen im Rahmen des OVeR-Projekts (Modul II) (Quelle: BÖCKMANN et al. 2018a, verändert)

#### 4.1.1.2 Strömungsberuhigte Bereiche

##### 4.1.1.2.1 Anzuwendende Grundlagen

Im Rahmen der Untersuchungen zum Baldeney-Projekt (vgl. Kap. 3.2) zeigten Vorversuche, dass Aale das Einschwimmen in ein Fischlift-Modell über einen Absatz verweigerten (Abb. 4-5a). Darüber hinaus suchten bodenorientierte Arten, wie Quappen oder Gründlinge, strömungsberuhigte Bereiche (Totwasserzonen) in den Ecken des Versuchsmodells auf, um dort zu verweilen. Auch Vorversuche zum Modul I des OVeR-Projektes zeigten, dass sich die untersuchten Fische vornehmlich in strömungsberuhigten Bereichen aufhielten, die sich u. a. vor dem Absatz des Rechens ausbildeten (Abb. 4-5b). Solche Verhaltensweisen resultieren nicht zuletzt daraus, dass die Tiere in dem Modell einer artspezifisch mehr oder weniger starken Stresssituation ausgesetzt sind (s. Kap. 4.1.2.4). Strömungsberuhigte Bereiche bieten in solchen Situationen ein gewisses Maß an Sicherheit und setzen darüber hinaus den Energieverbrauch des Fisches herab. HOFFMANN et al. (2010) konnten beispielsweise mittels Sonaruntersuchungen im Freiland zeigen, dass sich Fische, die durch einen Rechen in einen Turbinenzulaufkanal geraten, in strömungsberuhigten Bereichen vor der zunehmenden Strömung verbergen. Weitere Untersuchungen belegen, dass Fische verschiedene Strukturen in Flussauen aufsuchen, um sich bei Hochwasserereignissen vor extremen Strömungen zu schützen (WOLTER & SCHOMAKER 2007) oder um sich vor Prädatoren zu verbergen (KEENLEYSIDE 1979, GODIN 1997). Bei dem im Labor beobachteten Verweilen der Fische in strömungsberuhigten Bereichen handelt es sich also um ein natürliches Sicherheitsverhalten. Speziell solche Verhaltensweisen können jedoch dazu führen, dass die Testfische nicht oder nur eingeschränkt auf die eigentlich zu untersuchenden Teststrukturen reagieren und es keine aussagekräftigen Ergebnisse gibt. Es ist daher notwendig, strömungsberuhigte Bereiche in den Laboruntersuchungen so weit wie möglich zu eliminieren. Dieser Aspekt gilt im Übrigen auch für reale Anlagen im Freiland.

Zur Eliminierung strömungsberuhigter Bereiche in den Hauptversuchen im Baldeney-Projekt wurde daher die Einstiegsöffnung des Lift-Modells über eine Rampe mit der



Sohle der Vorkammer verbunden (Abb. 4-5c). Darüber hinaus wurden die Eckbereiche seitlich des Lift-Einstiegs über einen Angleichwinkel von  $30^\circ$  so verschlossen, dass sich dort keine strömungsberuhigten Bereiche mehr ausbildeten.

#### 4.1.1.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt

Strömungsberuhigte Bereiche wurden im Rahmen des Moduls II mittels Anrampungen ausgeschlossen (Abb. 4-5d). Dazu wurden bereits im Rahmen des Untersuchungsmoduls I schräge Elemente an den Seiten des Rechens sowie am Rechenfuß installiert (s. o.). Auch im Startbereich wurden strömungsberuhigte Bereiche mittels Anrampungen eliminiert (Abb. 4-6).

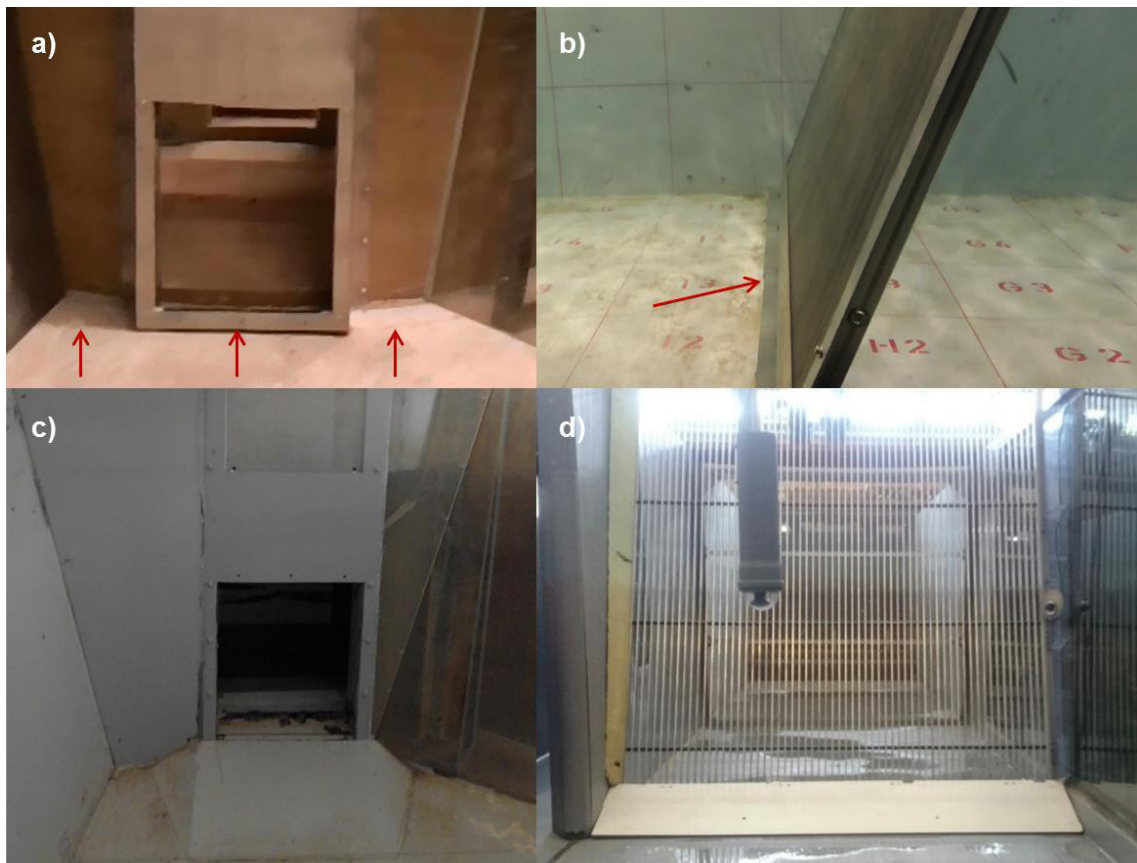


Abb. 4-5: Bauliche Modifikationen zur Eliminierung strömungsberuhigter Bereiche - Blick auf die Einstiegsöffnung des Lift-Modells im Wasserbaulabor des KIT (Baldeney-Projekt) a) mit Absatzkante und c) mit Anrampung (Quelle: HOFFMANN & BÖCKMANN 2015, verändert) sowie Blick auf den Modell-Rechen im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt), b) mit Kante am Rechenfuß und d) mit Anrampung am Rechenfuß; rote Pfeile weisen auf strömungsberuhigte Bereiche hin

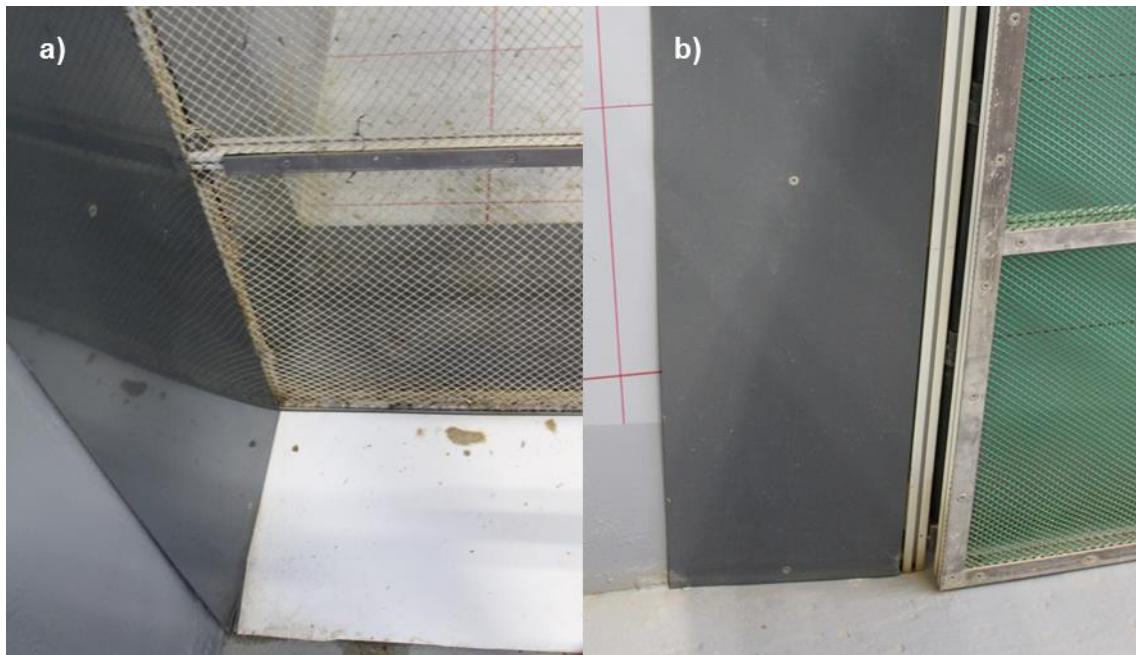


Abb. 4-6: Bauliche Modifikationen zur Eliminierung strömungsberuhigter Bereiche im Startbereich der ethohydraulischen Versuchsrinne im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt), a) Vertikale und horizontale Anrampung des Fischschutzgitters am oberstromigen Ende der Versuchsrinne, b) Vertikale Anrampung im Bereich des Starttores

Um ein Einschwimmen kleinerer Aale hinter das Starttor (im Bereich der Scharniere) während der Untersuchungen und damit einen Ausschluss dieser Probanden von der Datenaufnahme zu verhindern, mussten diese Bereiche ebenfalls abgedichtet werden (Abb. 4-6b).

Scharfe Ecken und Kanten im Modell sind zu vermeiden, um Verletzungen der Fische während der ethohydraulischen Tests auszuschließen. Darüber hinaus gehen von diesen Geometrien häufig Strömungsablösungen aus, die von den Fischen eher gemieden werden (LIAO 2007, ADAM & LEHMANN 2011, HERWIG & SCHMANDT 2018).

#### 4.1.1.3 Einfluss von Licht / Schatten

##### 4.1.1.3.1 Anzuwendende Grundlagen

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Durchführung ethohydraulischer Untersuchungen ist die Berücksichtigung möglicher Effekte durch Licht, insbesondere bei nacht- bzw. dämmerungsaktiven Fischarten.

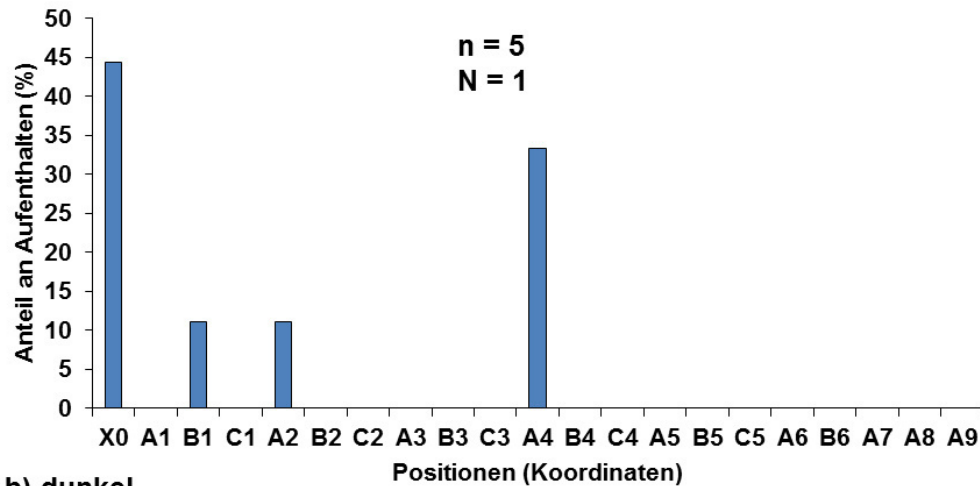
##### Einfluss verschiedener Lichtverhältnisse auf das Verhalten der Versuchsfische

Tests am KIT im Rahmen des Projektes „Fischschutz hinter dem Rechen“ zeigten (KIT & BUGeFi 2012), dass die Strömung zwar den wichtigsten verhaltensrelevanten Parameter darstellt, Unterschiede im Fischverhalten abhängig von den Lichtverhältnissen aber dennoch nachzuweisen waren. Es wurden Untersuchungen bei zwei verschiedenen Lichtintensitäten durchgeführt, wobei zwischen normaler Hallenbeleuchtung („hell“) und durch den Einsatz einer halbdurchsichtigen, lichtstreuenden Folie reduziertem Licht



(„dunkel“) unterschieden wurde. Unter anderem wurde beobachtet, dass dämmerungsaktive Quappen (*Lota lota* L.) bei Dunkelheit unterschiedliche Strömungsbereiche in der Versuchsrinne sondierten (vgl. Abb. 4-7b), während sie im Hellen überwiegend in strömungsberuhigten Bereichen verharrten (Abb. 4-7a). Zudem legten sie bei Dunkelheit längere Strecken (+ 44 %) in der Versuchsrinne zurück (Abb. 4-8).

**a) hell**



**b) dunkel**

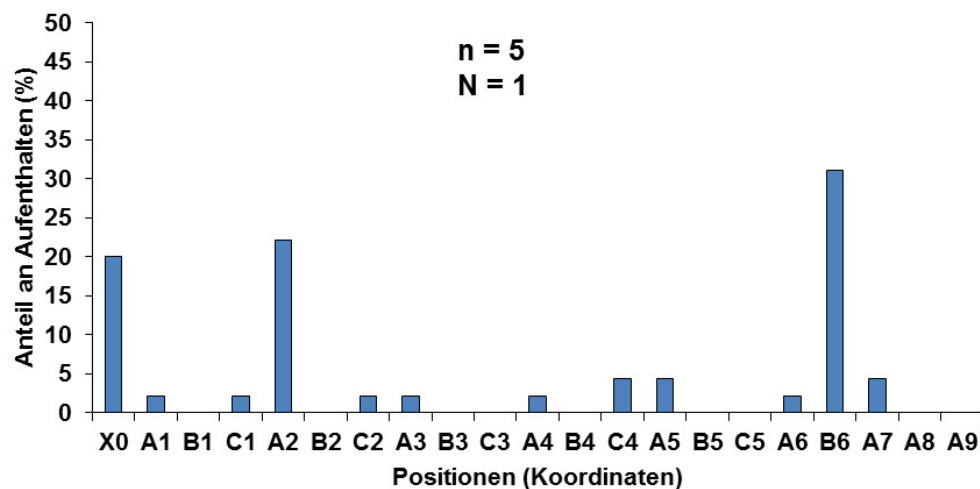


Abb. 4-7: Aktivität von Quappen in Abhängigkeit von verschiedenen Lichtintensitäten, dargestellt als Anteil an Aufenthalt an verschiedenen Positionen in einer ethohydraulischen Versuchsrinne, n = Anzahl an Probanden, N = Anzahl Untersuchungen (Quelle: KIT & BUGEFi 2012, verändert)

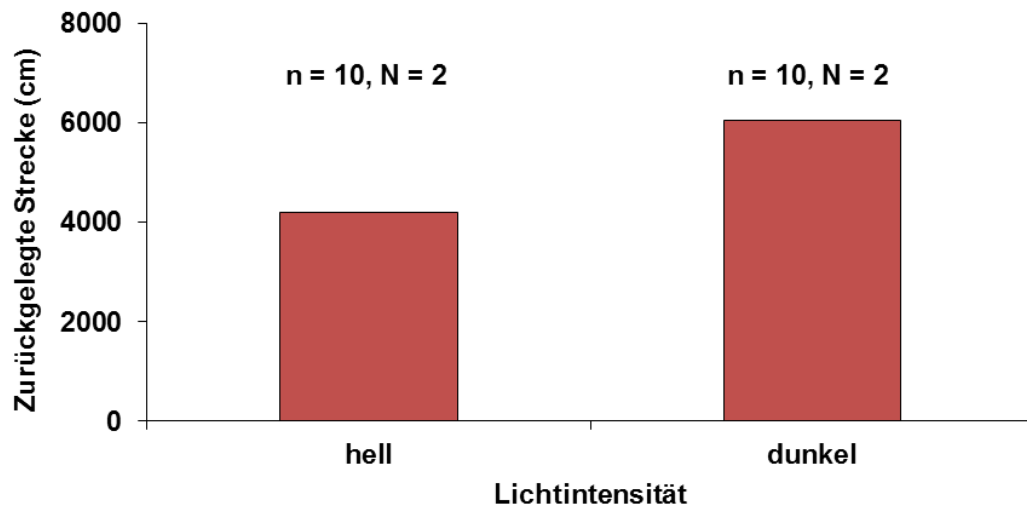


Abb. 4-8: Zurückgelegte Strecke von Quappen im ethohydraulischen Versuch im Zeitraum von 30 Minuten in Abhängigkeit von der Lichtintensität, n = Anzahl getesteter Probanden, N = Anzahl an Untersuchungen (Daten aus: KIT & BUGEFi 2012)

Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse auf deskriptiver Statistik basieren, bei den genannten Untersuchungen wurde noch keine schließende Statistik angewendet, weshalb Rückschlüsse auf Populationen oder Fischarten nicht ohne Weiteres möglich sind. Darüber hinaus war die Anzahl durchgeführter Untersuchungen an Quappen mit  $N = 1$  pro Setup sehr gering. Vor diesem Hintergrund ist das Ergebnis lediglich als Hinweis zu bewerten, erscheint unter Berücksichtigung der natürlichen Verhaltensweisen jedoch plausibel, da Quappen dämmerungs- und nachtaktiv sind. Während sie am Tage in strömungsärmeren Bereichen ruhen (GERSTMEIER & ROMIG 2003), gehen sie nachts in den schnellfließenden Bereichen auf Beutefang (RYDER & PESENDORFER 1992).

Die Ergebnisse der Quappen decken sich mit Ergebnissen, die im Rahmen des Baldeney-Projektes gewonnen wurden. Artübergreifend konnte bei den dort getesteten Fischen mit Ausnahme der Quappe kein Einfluss der Lichtverhältnisse auf das Einschwimmen in das Lift-Modell nachgewiesen werden (Tab. 4-1). Differenzierte Auswertungen des im Versuch beobachteten Verhaltens zeigten jedoch, dass durch Schattenwurf und Reflexionen der Deckenbeleuchtung auf der Sohle ein Teil der eingesetzten Probanden über den gesamten Versuchsverlauf den Startbereich nicht verließ. So befand sich der Startbereich durch die eingebauten Strukturen im Schatten und bot den eingesetzten Probanden somit Deckung. Auch dunklere Bereiche auf der Sohle wurden von den Fischen als vermeintliche Deckung genutzt. In der Konsequenz wurde der Versuchsstand für die Hauptversuche mit einer schwarzen Folie abgedeckt, so dass sich keine Schattenbereiche mehr ausbilden konnten.

Tab. 4-1: Fischarten, die in das Lift-Modell eingeschwommen (+) bzw. nicht eingeschwommen (-) sind bei abgedunkeltem und nicht abgedunkeltem Versuchsstand, n = Anzahl getesteter Probanden, grau hinterlegte Zellen: Fischart bei Setup nicht verfügbar (Quelle: BÖCKMANN et al. 2015, verändert)

Art	Lichtbedingungen			
	hell	n	dunkel	n
Aal <small>(inkl. Steigaal)</small>	+	14	+	147
Barbe	+	28	+	62
Barsch	+	49	+	139
Brassen	+	28	+	58
Döbel	+	20	+	53
Elritze			+	11
Forelle <small>(Bach-/Seeforellen)</small>	+	35	+	65
Gründling	+	6	+	24
Hasel	+	11	+	48
Hecht	+	5	+	23
Karpfen	+	1	+	4
Quappe	-	4	+	12
Rotaugen	+	36	+	135
Ukelei	+	12	+	30
Zander			+	4
Summe	9	249	25	815

Die Untersuchungen im Baldeney-Projekt zeigten, dass der Faktor Licht einen Einfluss auf das Verhalten der Probanden und deren Aktivität im Versuch hat. Um Versuchsbedingungen zu schaffen, die den Einfluss von Schattenbildungen durch Bauteile und Reflexionen auf der Wasseroberfläche bzw. der Sohle minimieren bzw. ausschalten, wird empfohlen, den Versuchsstand während der ethohydraulischen Untersuchungen mit einer Folie abzudecken. Um einen möglichen Einfluss von Licht und Schatten auszuschließen und insbesondere im Bereich von Einbauten gleichmäßige Lichtverhältnisse zu gewährleisten, sind entsprechende Messungen mit einem Luxmeter durchzuführen.

#### 4.1.1.3.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt

Aufgrund der Erfahrungen aus dem Baldeney-Projekt wurde im Rahmen von Modul II des OVeR-Projektes über den gesamten Versuchsbereich eine Folie gespannt, die eine diffuse Lichtverteilung erzeugte (Abb. 4-9). Dabei wurde darauf geachtet, dass weder die Beobachtung durch die Experimentatoren noch die Funktion der Kameras eingeschränkt wurde.



Abb. 4-9: a) Abgedunkelter Versuchsstand im Wasserbaulabor des KIT (Baldeney-Projekt, Quelle: BÖCKMANN et al. 2015); b) Abgedunkelter Versuchsstand im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt, Quelle: BÖCKMANN et al. 2018b)

Um weiteren Artefakten durch Schattenwurf und Reflexion entgegenzuwirken, wurden im Rahmen der OVeR-Untersuchungen auch betroffene Deckenfenster der Wasserbauhalle abgeklebt. Während der Untersuchungen wurde zudem stets die Deckenbeleuchtung ausgeschaltet.

#### **4.1.1.4 Schaffung einer farblich einheitlichen Umgebung**

##### **4.1.1.4.1 Anzuwendende Grundlagen**

Nicht nur Licht und Schatten (vgl. Kap. 4.1.1.3), sondern auch bestimmte Farbmuster können einen Einfluss auf das Verhalten der Probanden haben, wie eigene Beobachtungen aus ethohydraulischen Untersuchungen zeigten (vgl. Baldeney-Projekt). So nutzten einige Fische in der Vorversuchs-Phase zu den Untersuchungen des Baldeney-Projektes das heterogene Farbmuster auf der Sohle der Versuchsrinne, um auf den dunkleren Bereichen Deckung zu finden (Abb. 4-10a).

Wie schon vorab in Bezug auf die Strömungsschatten (vgl. Kap. 4.1.1.2) beschrieben, resultiert dieses Verhalten aus dem Bedürfnis der Fische nach Schutz vor potentiellen Feinden, welches hier durch Tarnung auf dunklen Bodenbereichen erfüllt wird (KEENLEYSIDE 1979, GODIN 1997). Auch hier kann ein solches Verhalten dazu führen, dass die Probanden an dem Versuch nicht teilnehmen und dieser dementsprechend keine auswertbaren Ergebnisse liefert. Im Baldeney-Projekt wurde daher die Versuchsrinne mit allen wesentlichen Komponenten in einem einheitlichen Grau gestrichen (Abb. 4-10b). Es hat sich gezeigt, dass die gewählte Farbgebung in Kombination mit der dunklen Abdeckplane weitestgehend einheitliche, diffuse Lichtverhältnisse schafft.

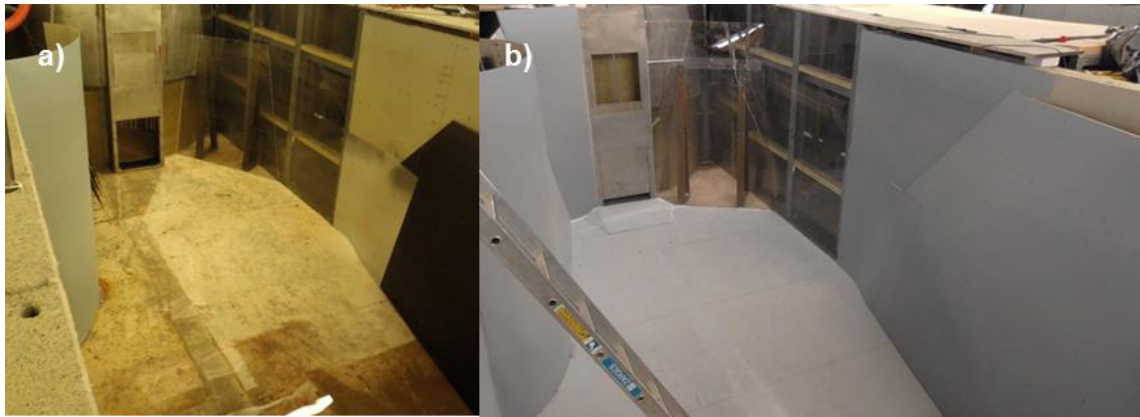


Abb. 4-10: Blick in den Versuchsstand im Wasserbaulabor des KIT (Baldeney-Projekt) mit  
a) heterogenem Farbmuster und b) einheitlicher Färbung

#### 4.1.1.4.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt

Auf Basis der im vorigen Abschnitt aufgeführten Erkenntnisse wurde im Rahmen des OVeR-Projektes der gesamte Versuchsstand in einem einheitlichen Grau gestrichen (Abb. 4-11).



Abb. 4-11: Blick in den Versuchsstand im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt) mit einheitlicher Graufärbung

#### 4.1.1.5 Beobachtungsraum und Verhalten der Experimentatoren während der ethohydraulischen Tests

##### 4.1.1.5.1 Anzuwendende Grundlagen

Der Ausschluss von Beobachtereffekten auf das arttypische Verhalten der Fische ist bei ethohydraulischen Untersuchungen äußerst wichtig. Prinzipiell besteht ein hohes Risiko der Beeinflussung der Probanden durch die Anwesenheit der Experimentatoren. Insbesondere Bewegungen und Geräusche, die nicht zugeordnet werden können, werden von Fischen in erster Linie als Anwesenheit von potentiellen Prädatoren interpretiert.

Störungen durch Beobachter oder das Umfeld sind unbedingt auszuschließen. Dafür wurde bereits in verschiedenen Untersuchungen das Prinzip eines speziellen Beobachtungsraumes eingeführt (vgl. ADAM & LEHMANN 2011). Hierbei handelt es sich um einen abgedunkelten Raum, in dem die Experimentatoren das Verhalten der Fische durch eine Beobachtungsscheibe aufnehmen können (Abb. 2-2). Im Beobachtungsraum dürfen keine raschen oder hektischen Bewegungen durchgeführt werden. Auch laute Geräusche oder Erschütterungen (z. B. Verschieben von Stühlen) sind während der Untersuchungen zu unterbinden. Dies gilt im Übrigen auch für alle anderen geräuscherzeugenden Aktivitäten in den jeweiligen Wasserbauhallen.

#### 4.1.1.5.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt

Ausgehend von den im vorigen Abschnitt beschriebenen Erfahrungen wurde für das OVeR-Projekt ein Beobachtungsraum konzipiert (Abb. 4-12). Zudem fand während der ethohydraulischen Untersuchungen in der Wasserbauhalle des IWW eine enge Abstimmung zwischen allen im Umfeld der Versuchsanlage tätigen Personen und den Experimentatoren des OVeR-Projektes statt. So wurden keinerlei laute Arbeiten oder solche, die zu Erschütterungen im Wasserkörper hätten führen können, durchgeführt. Besuchergruppen waren anzumelden und durften die Brücke oberhalb der Versuchsrinne während der ethohydraulischen Tests nicht betreten.

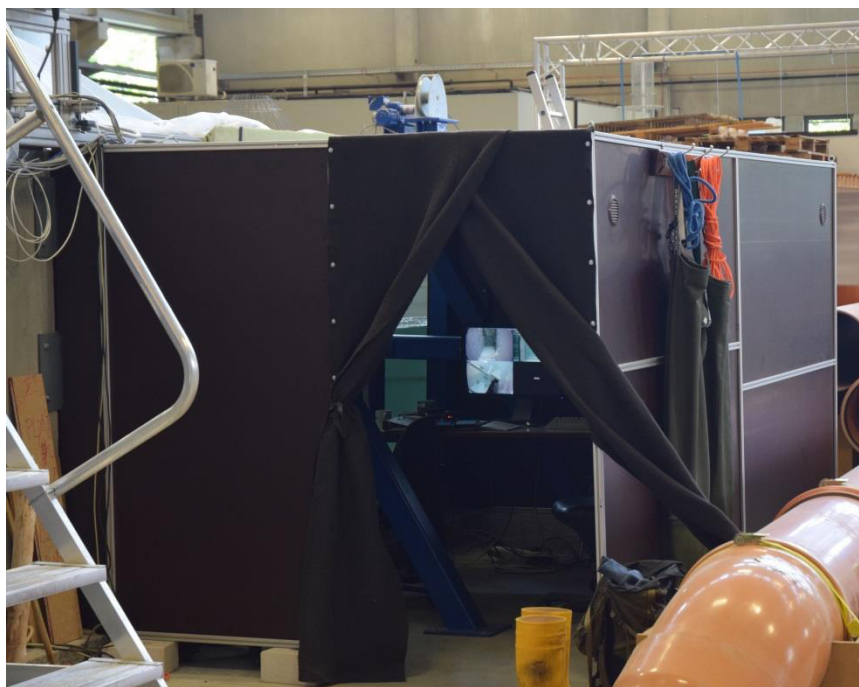


Abb. 4-12: An die Versuchsrinne angeschlossener Beobachtungsraum im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt)



#### **4.1.2 Verhaltensbiologische Grundlagen**

In den folgenden Abschnitten werden die ethohydraulisch relevanten biologischen Grundlagen behandelt.

##### **4.1.2.1 Motivation der Probanden**

###### **4.1.2.1.1 Anzuwendende Grundlagen**

Die Durchführung und Aussagekraft von Verhaltensbewertungen oder Ergebnissen ethohydraulischer Untersuchungen ist maßgeblich von der biologischen Aktivität (Motivation) der Versuchsfische abhängig (ADAM & LEHMANN 2011).

###### Allgemeines

Zeigen Probanden während eines Versuchs ein passives Verhalten, ist eine Auswertung und Interpretation von beobachteten Verhaltensweisen nicht möglich. Neben krankheitsbedingten Ursachen können sowohl modellspezifische Bedingungen (Modelleffekte, wie z. B. Strömungsschatten oder Lichtverteilung, s. o.) als auch suboptimale chemische oder physikalische Bedingungen des Wasserkörpers die Passivität im Verhalten der Tiere auslösen. Darüber hinaus ist jedoch auch die jeweilige Motivation der Fische von großer Bedeutung. Hier ist zu beachten, dass die Motivation von Fischen natürlichen tageszeitlichen, aber vor allem auch jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt (DWA 2005). Der jeweilige Motivationsgrad der Fische kann durch exogene Faktoren, wie die Wassertemperatur, die Tageslänge oder durch endogene, physiologische Faktoren gesteuert werden.

Gesundheitliche Beeinträchtigungen, die ein passives Verhalten auslösen können, lassen sich in der Regel anhand von äußeren Symptomen oder durch die Bewertung von artuntypischem Verhalten identifizieren, die Wandermotivation der Fische ist jedoch ein äußerlich nicht feststellbarer Parameter. Die maximale Motivation einer Fischart kann dabei in bestimmten Zeiträumen erwartet werden, in denen die Tiere über mehr oder weniger große Distanzen Wanderungen, beispielsweise zur Reproduktion oder Nahrungsaufnahme, durchführen (ADAM & LEHMANN 2011). Insbesondere die Phase der Wandermotivation ist ein bewährter Zeitraum für die Durchführung ethohydraulischer Tests, da die Fische während dieser Zeit versuchen, andere Habitate zu erreichen.

###### Wanderzeiträume

In der Literatur finden sich Angaben zu Zeiträumen, welche die Intervalle artspezifischer Wandermotivation näher eingrenzen. Tab. 4-2 und Tab. 4-3 fassen Zeiträume artspezifischer Wanderungsphasen zusammen. Die zugrundeliegenden Informationen stammen aus verschiedenen Monitoringuntersuchungen an Fischauf- oder Fischabstiegsanlagen oder beruhen auf Erfahrungswerten und Expertenwissen, welche in verschiedenen Arbeitsgruppen (DWA) zusammengetragen wurden.

Tab. 4-2 zeigt eine Zusammenstellung der artspezifischen Zeiträume aufwärtsgerichteter Fischwanderungen.

Tab. 4-2: Überblick über flussaufwärtsgerichtete Wanderzeiten verschiedener Fischarten, Hauptaufstiegszeiten sind dunkelgrün gefärbt (nach DWA 2014, verändert und ergänzt)

Fischart	Monat												Quelle
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	
Aal (Steigaaal)													JENS et al. 1997, DWA 2014
Äsche													JENS et al. 1997
Bachforelle													JENS et al. 1997
Bachneunauge													JENS et al. 1997
Barbe													JENS et al. 1997
Bitterling													JENS et al. 1997
Brassen													JENS et al. 1997
Döbel													JENS et al. 1997
Dreistacheliger Stichling													*KÜHLMANN 2014, DWA 2014
Eiritze													JENS et al. 1997
Finte													DWA 2014
Flunder													JENS et al. 1997
Flussbarsch													JENS et al. 1997
Flussneunauge													JENS et al. 1997, DWA 2014
Groppe													JENS et al. 1997
Gründling													JENS et al. 1997
Güster													JENS et al. 1997
Hasel													JENS et al. 1997
Hecht													JENS et al. 1997
Huchen													JENS et al. 1997
Karausche													JENS et al. 1997
Kaulbarsch													JENS et al. 1997
Lachs													JENS et al. 1997, DWA 2014
Maifisch													DWA 2014
Meeforelle													JENS et al. 1997, DWA 2014
Meerneunauge													JENS et al. 1997, DWA 2014
Moderlieschen													JENS et al. 1997
Nase													JENS et al. 1997
Quappe													JENS et al. 1997
Rapfen													JENS et al. 1997
Rotaugen													JENS et al. 1997
Rotfeder													JENS et al. 1997
Schleie													*UPHOFF 2014
Schmerle													SCHMALZ et al. 2001
Stint													DWA 2014
Stör													DWA 2014
Wels													GERTSMIEER & ROMIG 2003
Zander													GERTSMIEER & ROMIG 2003

\*mündliche Mitteilung

Tab. 4-3 gibt einen Überblick über flussabwärtsgerichtete Wanderzeiten verschiedener Fischarten.



Tab. 4-3: Überblick über flussabwärtsgerichtete Wanderzeiten verschiedener Fischarten, Hauptabstiegszeiten sind dunkelblau gefärbt (nach WASSER UND UMWELT 2010 und EBEL 2018, verändert und ergänzt)

Fischart		Monat												Quelle
		Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	Oktober	Nov	Dez	
Aal	Gelbaal <sup>a)</sup>						20-60 cm							EBEL 2018
	Blankaal <sup>a)</sup>						30 - 45 cm (Männchen) bzw. 50 - 90 cm (Weibchen)							EBEL 2018, HOLZNER 2000, DWA 2005
	Smolts <sup>b)</sup>						10-25 cm							EBEL 2018, DWA 2005, JONSSON 1991
Atlantischer Lachs	Kelts						50 - 120 cm							EBEL 2018, DWA 2005
Bachforelle														HOLZNER 2000
Barbe														HOLZNER 2000, SCHMALZ & SCHMALZ 2007
Brasse														HOLZNER 2000
Europäischer Stör	Larven + Juvenile						mehrschmmerige (< 60 cm)							EBEL 2018
	Adulte						100 - 400 cm							EBEL 2018
	Juvenile						≤ 11 cm							EBEL 2018
	Adulte						20 - 50 cm							EBEL 2018
Finte														HOLZNER 2000
Flussbarsch	Juvenile						10 - 15 cm							EBEL 2018
Flussneunaugen														SCHMALZ & SCHMALZ 2007
Gründling														SCHMALZ & SCHMALZ 2007
Güster														HOLZNER 2000
Hasel														HOLZNER 2000, SCHMALZ & SCHMALZ 2007
Hecht														HOLZNER 2000
Kaulbarsch														HOLZNER 2000
Maifisch	Juvenile													EBEL 2018
	Adulte													EBEL 2018
	Juvenile						12 - 17 cm							EBEL 2018, DWA 2005, JONSSON 1991
Meerneunaugen														HOLZNER 2000
Nase														HOLZNER 2000
Rapfen														HOLZNER 2000
Rotauge														HOLZNER 2000, SCHMALZ & SCHMALZ 2007
Schleie														HOLZNER 2000
Schmerle														SCHMALZ & SCHMALZ 2007
Wels														HOLZNER 2000
Zander														HOLZNER 2000
potamodrome Arten	Juvenile						≤ 3 cm							EBEL 2018
	Adulte						5 - > 150 cm							EBEL 2018
							3 - 70 cm							EBEL 2018, DWA 2005

<sup>a)</sup> Einfluss des ansteigenden Abflusses | <sup>b)</sup> Einfluss der ansteigenden Wassertemperatur (über 10 °C)

### Motivation in ethohydraulischen Untersuchungen

In eigenen ethohydraulischen Forschungsprojekten konnte bereits gezeigt werden, dass die Motivation zum jeweiligen Untersuchungszeitraum einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten der Fische hat (BÖCKMANN et al. 2015).

Abb. 4-13 gibt einen Überblick über die Aktivität verschiedener Fischarten, die im Rahmen ethohydraulischer Tests zum Fischeufstieg untersucht wurden (BÖCKMANN et al. 2015, HOFFMANN & BÖCKMANN 2015). Für die Auswertung wurde das Ein- bzw. Ausschwimmen in ein bzw. aus einem Lift-Modell als Maß für die Aktivität zu Grunde gelegt. Dieses Maß wurde später auf die Anzahl eingesetzter Probanden pro Art normiert.

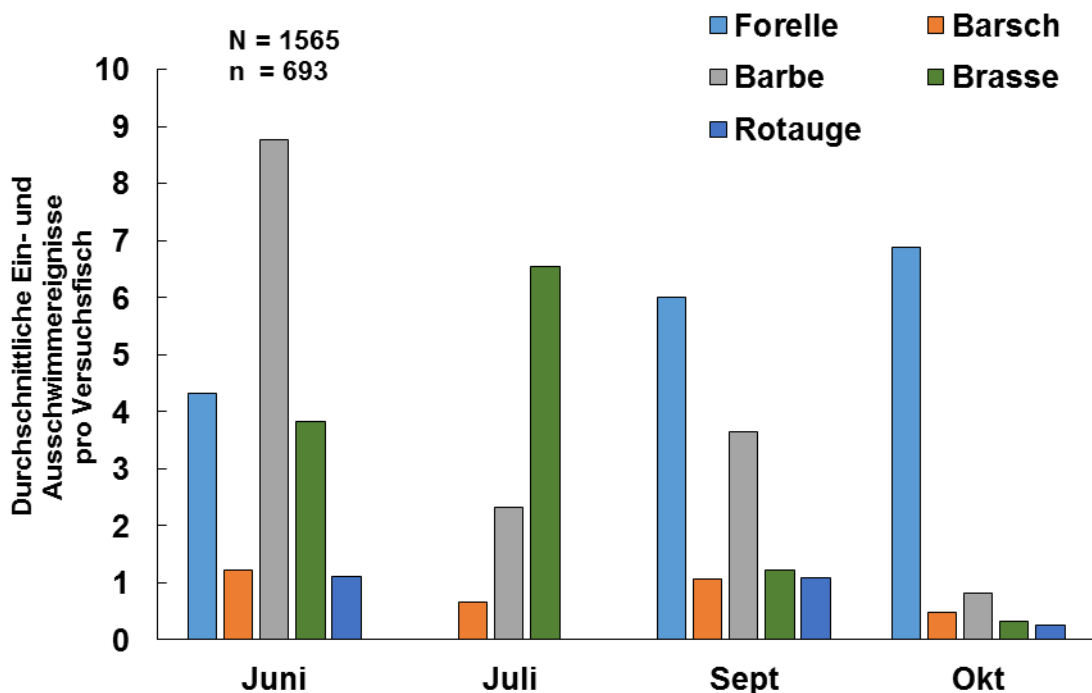


Abb. 4-13: Aktivität der getesteten Fischarten, dargestellt als Ein- bzw. Ausschwimmereignisse am Lift-Modell, in Abhängigkeit vom Untersuchungszeitraum, N = Anzahl an Ein- bzw. Ausschwimmereignissen, n = Anzahl an Probanden (Quelle: HOFFMANN & BÖCKMANN 2015, verändert)

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Aktivität der einzelnen Fischarten auch im ethohydraulischen Modell jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. So zeigten Brassen aufgrund ihrer Fortpflanzungszeit im Juni und Juli eine höhere Aktivität als im Oktober. Auch die Aktivität der Barben, die im Frühjahr in ihre Reproduktionshabitate aufsteigen, sank im Laufe des Jahres. Bei den Forellen als Winterlaicher, die sich gewässeraufwärts orientieren, um für sie günstige Fortpflanzungshabitate zu finden, konnte dagegen im Oktober die höchste Aktivität beobachtet werden. Diese Beobachtungen decken sich mit den Literatursauswertungen aus Tab. 4-2 und verdeutlichen, dass das Wissen über die Lebensweise der Testarten, speziell über die artspezifischen Wanderungsphasen, in der Versuchsplanung berücksichtigt werden muss. Im Falle von Gemischtgruppen ist es außerdem von besonderer Bedeutung, nur Fischarten mit glei-

chen Motivationszeiträumen gemeinsam zu testen. Eigene Untersuchungen im Baldeney-Projekt zeigten, dass Bachforellen, die sich im Höhepunkt ihrer Fortpflanzungszeit befanden, massiv das Verhalten von Versuchsfischen anderer Arten beeinflussen können, indem sie die von ihnen als potentielle Konkurrenten angesehenen Fische vertrieben und ihnen damit ein Einschwimmen in das Modell verwehrten.

Die Vorhersagbarkeit der Motivation auf Basis der in der Literatur angegebenen Wanderungsphasen kann sich zwischen verschiedenen Fischarten stark unterscheiden. So wurde im Rahmen verschiedener eigener ethohydraulischer Untersuchungen immer wieder festgestellt, dass insbesondere Aale in Laboruntersuchungen wenig Aktivität zeigten (vgl. BUGEFi & KIT 2016, KLOPRIES et al. 2017b). Obwohl Blankaale ihren Abwanderpeak im Herbst haben (BRUIJS & DURIF 2009), konnten in dieser Zeit nur wenige verwertbare Ergebnisse im Labor gewonnen werden. Dies steht im Gegensatz zu ethohydraulischen Untersuchungen, die mit Lachssmolts durchgeführt wurden. Hier war die im Frühjahr auftretende Abwandermotivation maßgeblich für bewertbare Ergebnisse. Dementsprechend zeigen sich in Bezug auf Lachssmolts und Aale Unterschiede in der Möglichkeit, den Motivationszeitraum eingrenzen zu können.

#### Bestimmung der Abstiegsmotivation von Lachsen

Während es bei Lachssmolts auf Grundlage der angegebenen Wanderungszeit (April bis Mitte Mai, vgl. Tab. 4-2) sowie der silbrigen Färbung der Tiere relativ einfach ist, den Abwanderzeitraum recht genau (Eingrenzung bis auf 2 bis 3 Wochen) zu bestimmen, ist es im Falle von Blankaalen schwieriger. Im Rahmen der sogenannten Smoltifizierung beginnen Lachse, sich auf die veränderten Umweltbedingungen, denen sie während des Abstiegs vom Süß- in das Salzwasser ausgesetzt sind, einzustellen. Tageslänge und Wassertemperatur initiieren bei Lachsen physiologische Veränderungen (THORSTAD et al. 2012). So müssen die Tiere sich u. a. auf die Fähigkeit vorbereiten, Salze zu sezernieren (BONE & MOORE 2008). Die physiologischen Anpassungen führen dabei auch zu der charakteristischen Silberfärbung, die den Fischen dabei hilft, sich in der pelagischen Umgebung besser zu tarnen (THORSTAD et al. 2012).

Im Falle von Lachsen hat sich gezeigt, dass die Auswahl motivierter Versuchstiere anhand morphologischer Merkmale sehr gut funktioniert. Das zeigen die Ergebnisse der ethohydraulischen Untersuchungen zum Fischabstieg über den Fischlift (BUGEFi & KIT 2016), bei denen ebendiese Methode angewandt wurde. Abb. 4-14 zeigt, dass im Versuch 94 % der getesteten Lachssmolts in den Fischlift eingeschwommen und sämtliche Probanden (100 %) aus dem Lift in das Oberwasser ausgeschwommen sind.

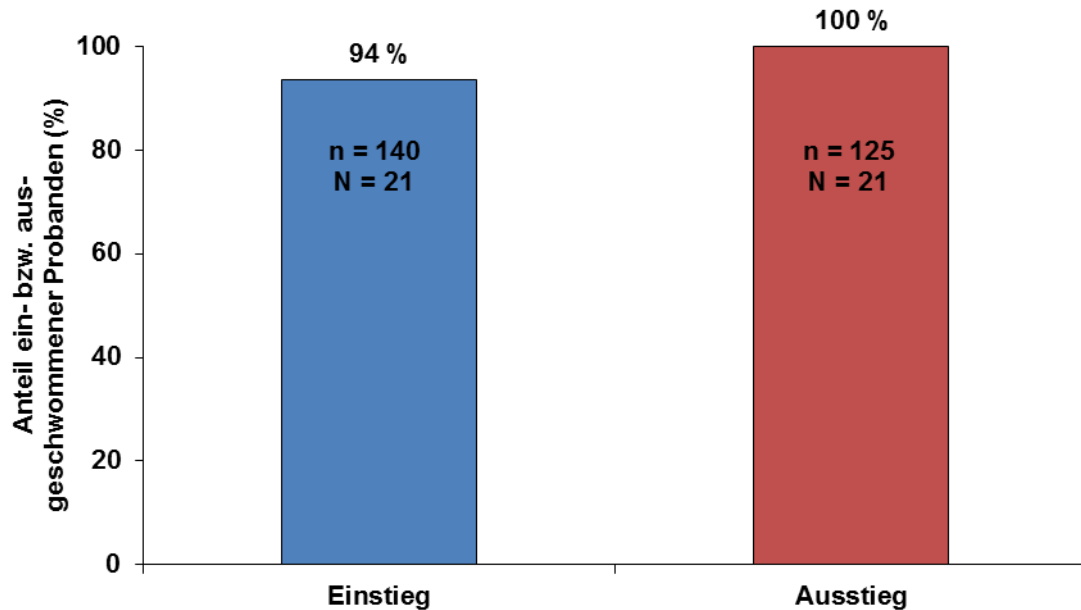


Abb. 4-14: Anteil an Lachssmolts, die in das Lift-Modell eingeschwommen (blaue Säule) bzw. ausgeschwommen (rote Säule) sind, n = Anzahl getesteter Probanden, N = Anzahl an Tests (Quelle: BUGEFI & KIT 2016)

#### Bestimmung der Abstiegsmotivation von Aalen

Die in den ethohydraulischen Untersuchungen verwendeten Aale werden in der Regel über Berufsfischer bezogen, welche die abwanderwilligen Tiere mit Reusen abfangen. Es ist also eigentlich davon auszugehen, dass die Fische zum Zeitpunkt der Untersuchungen abstiegswillig sind. In eigenen Laboruntersuchungen hat sich jedoch immer wieder gezeigt, dass ein Großteil der zu testenden Individuen in der Versuchsrinne passives Verhalten zeigte, wodurch die Motivation wiederum in Frage gestellt wurde.

Ähnlich wie für Lachse, besteht aber auch für Aale die Möglichkeit, motivierte von unmotivierten Tieren anhand morphologischer Merkmale zu unterscheiden (PANKHURST 1982). Bevor Aale in Richtung ihrer Laichgebiete in die Sargassosee abwandern, verändert sich ihr Erscheinungsbild. Neben der deutlichen Vergrößerung der Augen (Abb. 4-15) und Brustflossen, nimmt der Kopf eine deutlich spitzere Form an. Darüber hinaus ist eine silbrig glänzende Färbung charakteristisch (vgl. GERSTMEIER & ROMIG 2003). Diese als Blankaal bezeichneten Tiere werden als abstiegsmotivierte Tiere eingestuft und können in ethohydraulischen Abstiegsuntersuchungen eingesetzt werden.

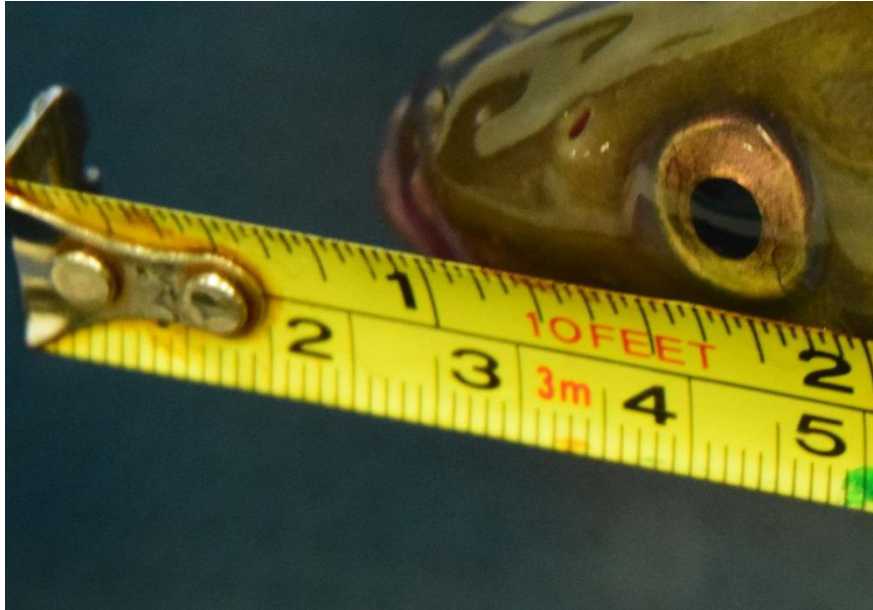


Abb. 4-15: Stark vergrößertes Auge eines Blankaales

Um die Vorhersagbarkeit der Abstiegs motivation von Aalen anhand morphologischer Merkmale zu untersuchen, führte das Büro für Umweltplanung im Rahmen des OVeR-Projektes eine Studie an Aalen durch (FESTER 2017). Dazu wurden die Versuchstiere in Anlehnung an DURIF et al. (2005) in fünf unterschiedliche Entwicklungsstadien eingeordnet, gemessen an Augen- und Brustflossen-Index, Körperlänge und Färbung (von Stadium 0 = Gelbaal-Stadium bis Stadium IV = Blankaal-Stadium). Der Schwerpunkt der Studie lag auf der experimentellen Untersuchung der Aktivität der Probanden in Abhängigkeit von den genannten Entwicklungsstadien. Es wurde die Hypothese zugrunde gelegt, dass die Aktivität der Aale positiv mit ihrem Entwicklungsstadium korreliert ist.

Abb. 4-16 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen. Dargestellt ist die Anzahl an Kontakten von Aalen mit einem Fischschutzzrechen im Modell als Maß für die Aktivität in Abhängigkeit vom jeweiligen Entwicklungsstadium.

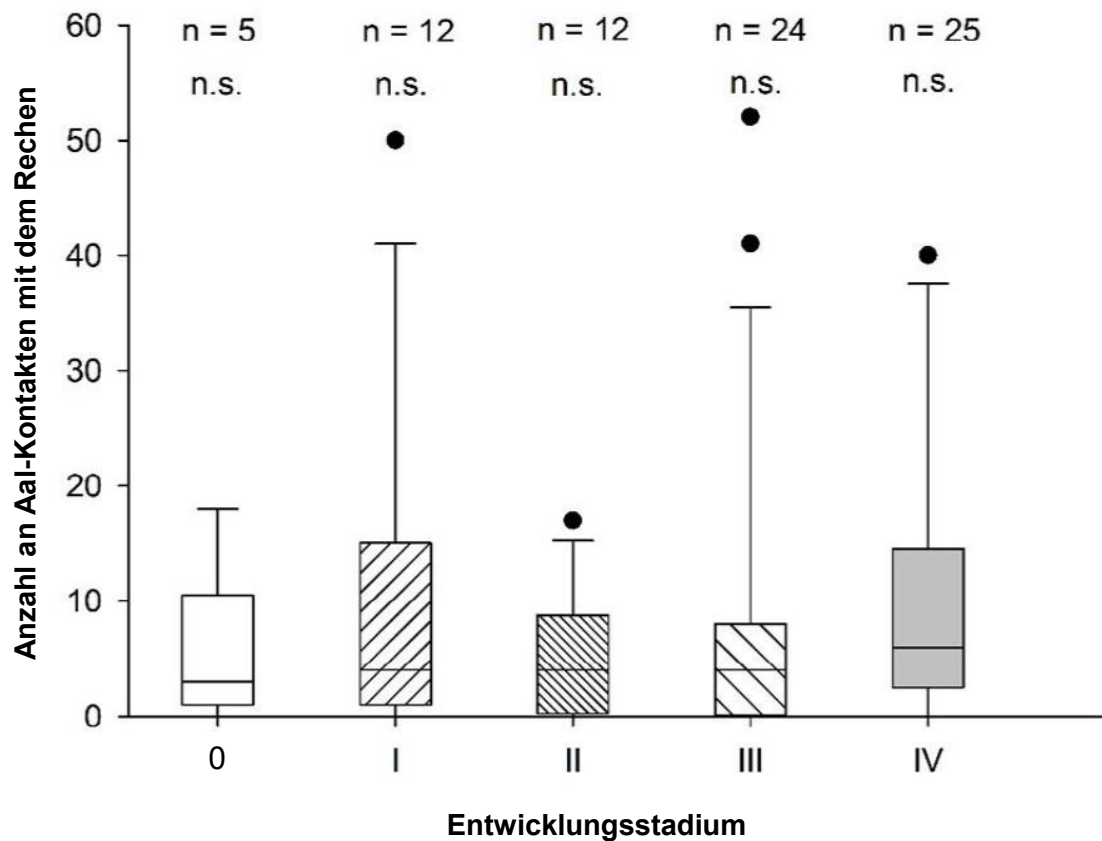


Abb. 4-16: Anzahl an Kontakten von Aalen mit einem Fischschutzrechen als Maß für die Motivation in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium (0 = Gelbaal-Stadium, I-III = Zwischenstadien, IV = Blankaal-Stadium), dargestellt als Box-Whisker-Plots, n = Anzahl getesteter Aale, stat. Test: Kruskal-Wallis-Test auf Unterschiede zwischen den verschiedenen Entwicklungsstadien, n. s. = nicht signifikant bei  $p \geq 0,05$  (Quelle: FESTER 2017, verändert)

Abb. 4-16 zeigt, dass im Modellversuch kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Aktivität und dem Entwicklungsstadium der Probanden, welches als Maß für die Motivation gilt, nachgewiesen werden konnte.

Die getesteten Aale des Entwicklungsstadiums 0, die als nicht bis geringfügig abwanderwillig gelten, zeigten im Mittel 3 Kontakte mit dem Fischschutzrechen. Individuen des Entwicklungsstadiums IV unterschieden sich davon mit durchschnittlich 6 Interaktionen nur marginal. Auch in den Untersuchungen von EICKERLING (2018) konnte keine Korrelation zwischen dem Entwicklungsstadium und der Aktivität von Blankaalen im Modell nachgewiesen werden.

Die Untersuchungen von FESTER (2017) haben Hinweise darauf gegeben, dass die Aktivität der Aale im Versuchsmodell neben dem Entwicklungsstadium von weiteren Parametern abhängig ist. Anhand eigener Beobachtungen und unter Berücksichtigung von Freilandstudien (TESCH 1999, STEIN et al. 2016, WENDLING 2017) scheint die Wassertemperatur ein wichtiger Faktor für die Aktivität der Aale zu sein (vgl. Kap. 4.1.3.1).

### Bestimmung der Abstiegsmotivation potamodromer Arten

Für die Bestimmung der Abwanderungszeit potamodromer Fischarten können häufig keine morphologischen Merkmale herangezogen werden. Außerdem wird bei einigen Arten, wie z. B. dem Rotaugen, die Bestimmung des Zeitpunkts der maximalen Wandermotivation durch einen relativ langen Abstiegszeitraum (hier April bis Januar, vgl. Tab. 4-3) erschwert. Allerdings lassen einige Beobachtungen den Zeitraum für eine abwärtsgerichtete Wandermotivation von Rotaugen weiter eingrenzen. So ist der Literatur zu entnehmen, dass insbesondere juvenile Rotaugen in Folge jahreszeitlich bedingter Temperaturabsenkung im Herbst in Richtung strömungsberuhigter Altarme bzw. im Falle adulter Tiere zurück in das Hauptgewässer abwandern (SCHWEVERS 1998, BORCHERDING et al. 2002). Ebenfalls im Herbst und Winter konnten abwärtsorientierte, größere Fischschwärme juveniler Karpfenartiger im Rahmen von eigenen Sonaruntersuchungen vor Wasserkraftanlagen beobachtet werden (BUGEFi et al. 2014, BUGEFi 2014). Weiter konnte eine größere Anzahl an Rotaugen bei Reusenfängen im November und Anfang Januar nachgewiesen werden (BUGEFi 2017), was die abwärtsgerichtete Motivation der Tiere zu dieser Zeit bestätigt (Abb. 4-17, Abb. 4-18).

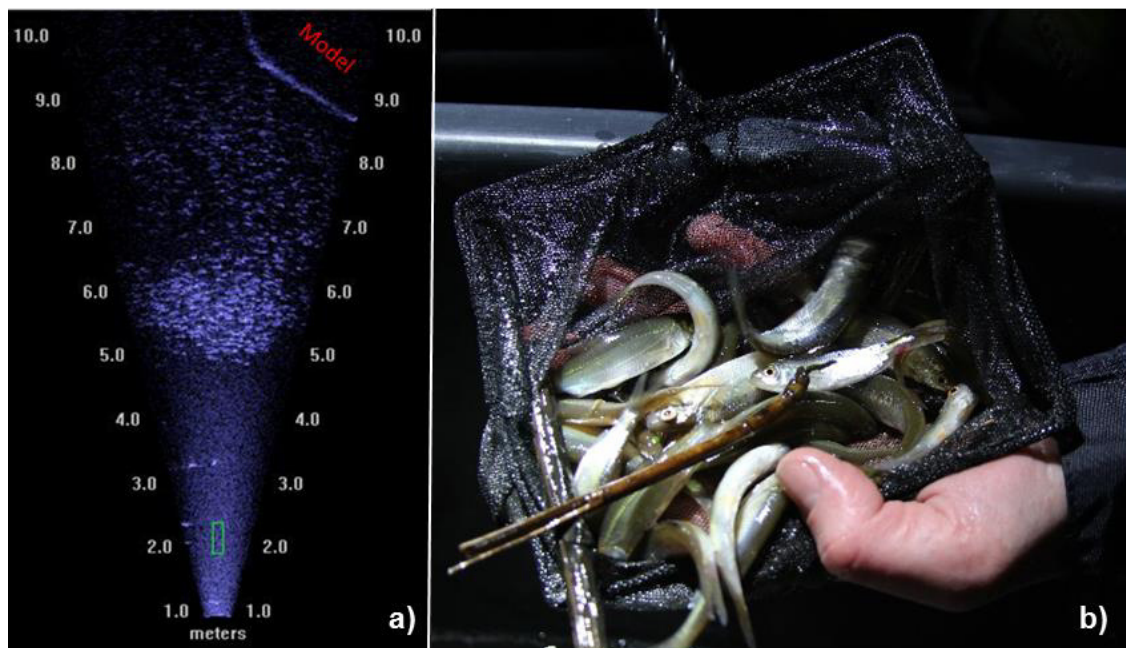


Abb. 4-17: a) Sonar-Aufnahme eines Schwarms Karpfenartiger vor einem Abstiegsanlagen-Modell im Freiland und b) Reusenfang (u. a. Rotaugen) im Abstiegsanlagen-Modell vom 10. Januar 2017 (Quelle: BUGEFi 2017)



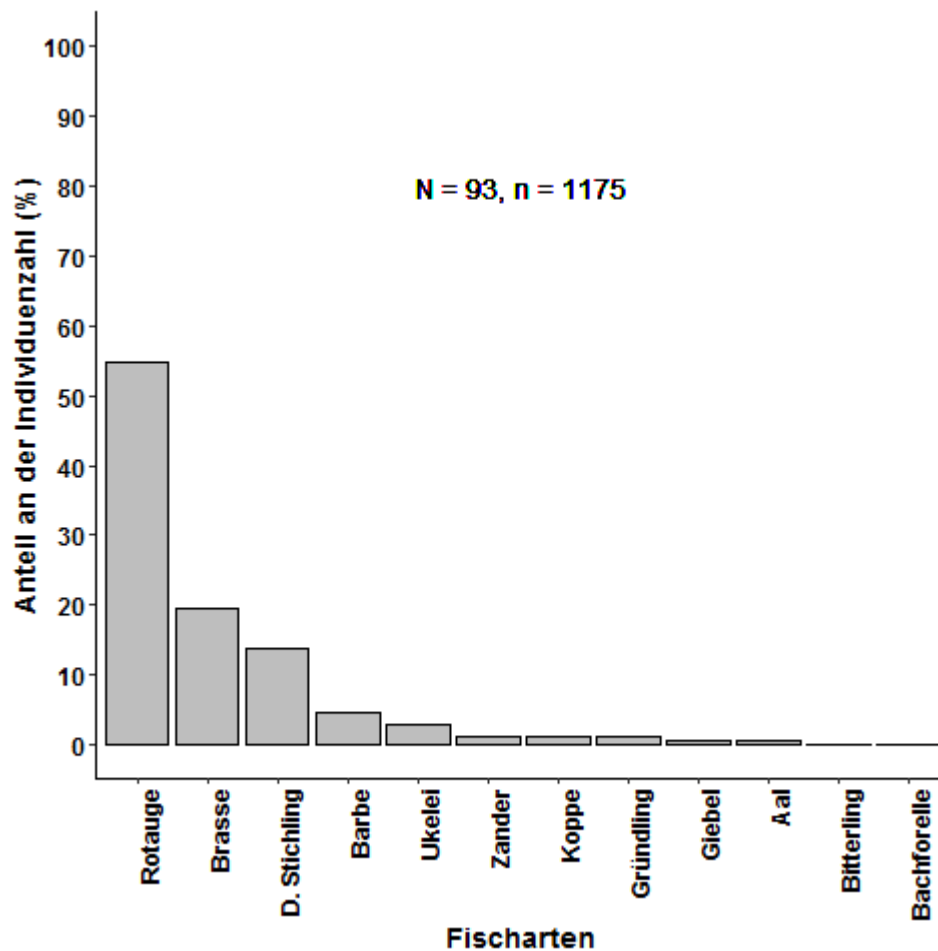


Abb. 4-18: Anteil verschiedener Fischarten an der Gesamtzahl der Individuen in der Fangkammer eines Abstiegsanlagen-Modells (Datenaufnahme: Dezember 2015 bis Januar 2016 sowie Juli 2016 bis Februar 2017), D. Stichling = Dreistachliger Stichling, N = Anzahl Fangkammer-Leerungen, gesamt, n = Anzahl Individuen, gesamt (Daten aus: BUGEFI 2017)

### Zusammenfassung

In ethohydraulischen Untersuchungen müssen die oben genannten Zeiträume der art-spezifischen Wanderphase Beachtung finden (Tab. 4-2 und Tab. 4-3). Wenn die jeweilige Motivation der Probanden keine Berücksichtigung findet, besteht die Gefahr, dass passives Verhalten unmotivierter Tiere fälschlicherweise dahingehend interpretiert wird, dass die zu untersuchende Struktur von den Tieren nicht angenommen wird und damit nicht funktioniert. Darüber hinaus ist auch der Gesundheitszustand der Probanden bei Eintreffen in den jeweiligen Wasserbaulaboren sowie während der Untersuchungen täglich zu überprüfen, um erkrankte Tiere von den ethohydraulischen Tests auszuschließen. So lässt sich eine Verfälschung der Ergebnisse durch passives Verhalten der Probanden vermeiden.

#### **4.1.2.1.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt**

Die Untersuchungen zum seitlichen Bypass im OVeR-Projekt wurden mit drei verschiedenen Fischarten durchgeführt. Dabei war es für die Untersuchungen am getes-



teten Abstiegssystem von ausschlaggebender Bedeutung, dass die getesteten Probanden abstiegsmotiviert sind.

Nach Eintreffen der Fische im Wasserbaulabor des IWW wurden diese, bevor sie in die entsprechende Hälterungsanlage umgesetzt wurden, langsam an die dort herrschenden Wasserparameter akklimatisiert. Darüber hinaus sind die Fische auf etwaige Krankheiten untersucht worden.

#### Anwendung auf Lachssmolts

Für den Lachs kann aus Tab. 4-3 ein Abstiegszeitraum von März bis Juni, mit einer Hauptabstiegszeit von April bis Mitte Mai, abgelesen werden (JONSSON 1991, DWA 2014, EBEL 2018). Für die Smolts ist dabei ein Anstieg der Wassertemperatur auf über 10 °C Auslöser für eine abwärtsmotivierte Wanderung. Über das Feststellen der morphologischen Veränderung in Form einer silbrigen Färbung (BONE & MOORE 2008, THORSTAD et al. 2012) konnten für die ethohydraulischen Tests relativ einfach abstiegsmotiviert Probanden ausgewählt werden. Abb. 4-19 zeigt einen noch nicht smoltifizierten jungen Lachs mit den charakteristischen seitlichen Streifen und roten Punkten sowie einen Lachssmolt mit schwarzen Punkten und der charakteristischen Silberfärbung sowie den schwarzen Flossensäumen.



Abb. 4-19: Junge Lachse a) vor und b) nach Einsetzen der Smoltifizierung

Vorversuche mit Lachssmolts wurden von April bis Anfang Mai 2017, Hauptversuche von Mitte Mai bis Anfang Juni 2017 durchgeführt.

#### Anwendung auf Rotaugen

Darüber hinaus wurden Untersuchungen mit einer potamodromen Fischart durchgeführt. Hierzu wurden Rotaugen ausgewählt. Auf Grundlage der oben beschriebenen Beobachtungen wurden die Untersuchungen für das Modul II von Oktober bis Novem-

ber 2017 durchgeführt. Nicht alle getesteten Rotaugen zeigten bei den ethohydraulischen Tests ein ausgeprägtes Abwanderverhalten, einige Probanden verblieben über den gesamten Untersuchungszeitraum im Startbereich. Dennoch konnten ausreichend Daten für eine statistische Auswertung aufgenommen werden (vgl. Kap. 4.3).

#### Anwendung auf Blankaale

Für Blankaale kann aus Tab. 4-3 eine Hauptabstiegszeit von September bis Januar abgelesen werden (HOLZNER 2000, DWA 2005, EBEL 2018). Für die OVeR-Untersuchungen standen insgesamt nur 54 Tiere zur Verfügung. Demnach mussten die Probanden nach einer angemessenen Zeitspanne wiederholt getestet werden, um eine aussagekräftige Statistik durchführen zu können. Der Umgang mit den dabei erhobenen Daten wird in Kap. 4.1.2.3 näher erläutert.

Die Vorversuche mit Blankaalen wurden im Dezember 2017 durchgeführt, für die Hauptversuche wurden die Probanden im Dezember 2017 und Januar 2018 getestet.

### **4.1.2.2 Gruppengröße und -zusammensetzung**

#### **4.1.2.2.1 Anzuwendende Grundlagen**

Zu Beginn einer ethohydraulischen Untersuchung muss eruiert werden, wie hoch die Gesamtanzahl an Versuchstieren zur Gewährleistung statistischer Aussagen sein muss (Stichprobenplanung, vgl. Kap. 5). Außerdem muss festgelegt werden, wie die Probanden sinnvoll auf einzelne Testgruppen aufgeteilt werden können, um auswertbare Daten zu produzieren, wie im Folgenden näher erläutert.

#### Anzahl an Individuen pro Test

Die Anzahl der pro Test eingesetzten Probanden ist stark von der Fragestellung abhängig. Geht es darum, zu untersuchen, ob die Versuchstiere generell eine bestimmte Struktur annehmen, kann auch eine größere Anzahl an Probanden eingesetzt werden. Da die eingesetzten Tiere erfahrungsgemäß jedoch nicht im selben Maße Aktivität zeigen, könnte es z. B. durch einen besonders aktiven Probanden zu Artefakten kommen, wenn dieser entweder das Verhalten der anderen Probanden beeinflusst (*leader*-Effekt, NAKAYAMA et al. 2012, REEBS 2000) oder ein von diesem Individuum wiederholt gezeigtes Verhalten mehrfach gezählt wird. Dieses Problem verstärkt sich, wenn nicht der gesamte Versuchsstand einsehbar ist und bei zu großen Gruppen Individuen nicht sicher unterschieden werden können. Fundierte Untersuchungen zur individuellen Dominanz (*leader*-Effekt, s. o.) sind relativ rar und liefern zudem widersprüchliche Hinweise; dabei spielen beispielsweise Nahrungsvorteile (vgl. NAKAYAMA et al. 2012; hungrigere Individuen übernehmen die Führung, um eine Nahrungsquelle vor den Konkurrenten zu erreichen) oder Territorialverhalten eine Rolle (KEENLEYSIDE 1979, GODIN 1997).

Um Individualverhalten zu erkennen (beispielsweise das wiederholte Einschwimmen eines Fisches in einen Zielbereich) und dieses später bei der Bewertung berücksichtigen zu können, muss das Verhalten auf Individuenniveau beobachtet werden. So kön-

nen beispielsweise Doppelzählungen ausgeschlossen werden. Hierbei ist es jedoch von Bedeutung, eine für den Experimentator beherrschbare Gruppengröße zu wählen. Eine Alternative zur konventionellen Beobachtung sind automatische Videoauswertungen, die jedoch auch hier die einzelnen Individuen *tracken* müssen und diese folglich nicht aus dem zu beobachtenden Bereich ausschwimmen dürfen. Die Kamera muss hierzu den gesamten Versuchsbereich abbilden können, um das einzelne Tier über die Versuchszeit verfolgen zu können.

Nicht zu empfehlen sind Tests mit einzelnen Individuen, einerseits aufgrund des hohen Zeitaufwandes bei großem Stichprobenumfang, andererseits, weil Fische natürlicherweise Gruppen bzw. Schwärme bilden (KEENLEYSIDE 1979, PITCHER 1986, GODIN 1997).

### Gruppenzusammensetzung

Beim Arbeiten mit Gemischtgruppen ist unbedingt darauf zu achten, inter<sup>16</sup>- bzw. intraspezifische<sup>17</sup> Effekte auszuschließen. In Bezug auf interspezifische Gemischtgruppen konnte u. a. im Rahmen eigener Untersuchungen zum Modul I des OVeR-Projektes nachgewiesen werden, dass verschiedene Arten durchaus zusammen getestet werden können. So bilden beispielsweise juvenile Flussbarsche (*Perca fluviatilis* L.) und Rotaugen (*Rutilus rutilus* L.) einen gemischten Schwarm (BÖCKMANN et al. 2015, LEHMANN et al. 2016, KLOPRIES et al. 2017b).

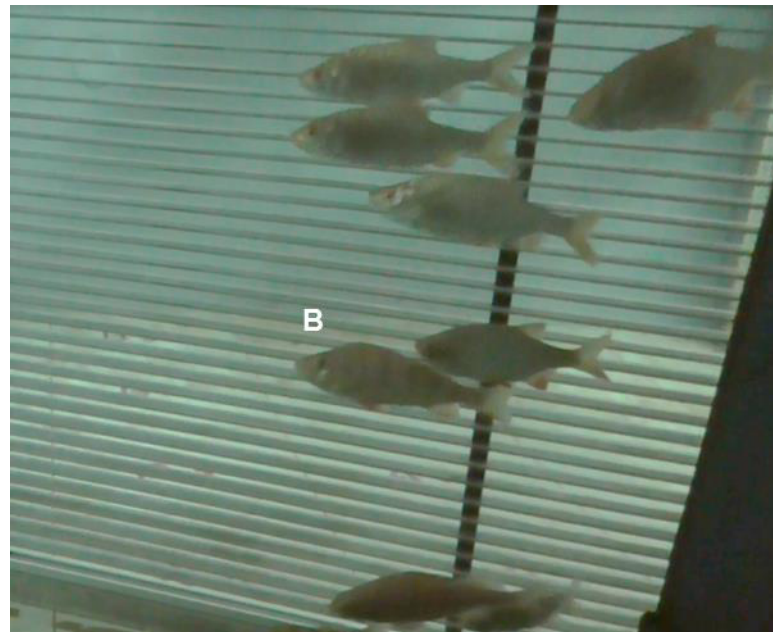


Abb. 4-20: Gemischter Schwarm aus Rotaugen und Flussbarsch (B) in einem ethohydraulischen Test im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (Modul I, OVeR-Projekt)

---

<sup>16</sup> Gruppen verschiedener Arten

<sup>17</sup> Gruppen einer Art

Auch Barben (*Barbus barbus* L.), Döbel (*Squalius cephalus* L.) und Brassen (*Abramis brama* L.) bildeten in Modelluntersuchungen zum Baldeney-Projekt gemischte Allianzen (Abb. 4-21) (BÖCKMANN et al. 2015).



Abb. 4-21: Gemischter Schwarm aus Barben, Döbel und Brasse in einem ethohydraulischen Modell im Wasserbaulabor des KIT (Baldeney-Projekt)

Bestimmte Konstellationen von Fischarten sind jedoch zu vermeiden, da einzelne Arten von anderen beeinträchtigt werden können. So ist es unzulässig, Raubfischarten mit Friedfischen zu mischen. Abb. 4-22 zeigt das Einschwimmen eines Hechtes (*Esox lucius* L.) in ein ethohydraulisches Modell, in einigerem Abstand dahinter halten sich verschiedene Friedfische auf, die in sein Beutespektrum passen (u. a. Döbel, Rotaugen, Beobachtungen aus dem Baldeney-Projekt). Dabei sei zu erwähnen, dass in den eigenen bisher durchgeführten ethohydraulischen Untersuchungen noch kein Prädationsereignis im Modell beobachtet wurde. Dennoch wird durch die Anwesenheit eines Raubfisches das Verhalten der potentiellen Beutetiere beeinflusst, die aufgrund ihrer natürlichen Lebensweise Prädatoren meiden.



Abb. 4-22: Einschwimmen eines Hechtes (H) und verschiedener Friedfische (Döbel, Rotaugen) in ein ethohydraulisches Modell im Wasserbaulabor des KIT (Baldeney-Projekt)

Auch verschiedene Friedfischarten können sich gegenseitig in ihrem Verhalten beeinflussen. So konnte im Modul I des OVeR-Projektes beobachtet werden, dass sich Gründlinge (*Gobio gobio* L.) einem Rotaugen-Schwarm anschlossen. Teilweise testete die bodenorientierte Art auch eine Rechen-Struktur im Freiwasser und zeigte damit kein arttypisches Verhalten.



Abb. 4-23: Gemischter Schwarm aus Gründlingen und Rotaugen in einem ethohydraulischen Versuchsmodell im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (Modul I, OVeR-Projekt)

Weiter wurde in eigenen ethohydraulischen Untersuchungen zum Fischabstiegsverhalten im Rahmen des Moduls I des OVeR-Projektes beobachtet, wie sich ein Rotaugen-Schwarm einem Brassen anschloss (Abb. 4-24). Hierbei können ebenfalls Artefakte bei der Bewertung entstehen. Im vorliegenden Fall ist zu beachten, dass keine Rückschlüsse auf das Verhalten der Rotaugen gezogen werden dürfen, wenn der Brassen ein bestimmtes Setup nicht annimmt. Es muss berücksichtigt werden, dass zwar der Brassen ein bestimmtes Setup bzw. eine bestimmte Struktur nicht annimmt (möglicherweise aufgrund seiner Hochrückigkeit), die Rotaugen aber in Abwesenheit des Brassens keine Probleme zeigen würden, die Struktur anzunehmen. Problema-

tisch sind damit modellbedingte Allianzen, die sich unter natürlichen Bedingungen im Freiland nicht unbedingt einstellen würden.



Abb. 4-24: Gemischter Schwarm aus Rotaugen und einem Brassen (Br) in einem ethohydraulischen Versuchsmodell im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (Modul I, OVeR-Projekt)

#### Zusammenfassung

Auf der Grundlage der vorangegangenen Erkenntnisse wird empfohlen, im Rahmen von Hauptversuchen keine gemischten Artengruppen zu testen. Vorversuche zur Überprüfung der generellen Funktionalität und Kalibrierung des Versuchs-Setups können dagegen mit Gemischgruppen durchgeführt werden, wobei die oben beschriebenen biologischen Aspekte der jeweiligen Fischarten in der Gruppe zu berücksichtigen sind (keine unterschiedlichen Motivationszeiträume, Räuber-Beute-Beziehungen etc.).

#### **4.1.2.2.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt**

Im Rahmen der Untersuchungen zum Modul II des OVeR-Projektes wurden ausschließlich Gruppen mit jeweils nur einer Fischart getestet. Darüber hinaus wurde eine individuelle Unterscheidung der Versuchstiere realisiert. Erfahrungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG, mdl. Mitteilung Dr. Schütz, SCHÜTZ & HENNING 2015) sowie aus den Vorversuchen zum Modul II haben gezeigt, dass drei Individuen optimal von zwei Beobachtern zu erfassen sind. Die individuelle Unterscheidung war entweder durch das Einsetzen von Probanden unterschiedlicher Körperlängenklassen (groß, mittel, klein) oder durch das Vorhandensein anderer markanter Merkmale (Verletzungen, Färbung etc.) möglich (Abb. 4-25). Die Vermessung der Körperlänge der Probanden erfolgte erst nach den Tests, um unnötigen Stress vor den Untersuchungen zu vermeiden.





Abb. 4-25: Individuelle Merkmale der Probanden (hier: Rotaugen), rote Kreise weisen auf markante Merkmale für eine individuelle Unterscheidung der Probanden hin

Durch die individuelle Unterscheidung konnte ein wiederholtes Überschwimmen der Ziellinie im Bypass bzw. Durchschwimmen des Rechens einem Individuum zugeordnet und damit doppelte Zählungen eines, womöglich aktiveren Individuums als solche registriert und in der späteren Auswertung entsprechend berücksichtigt werden.

#### 4.1.2.3 Wiederholte Verwendung der Probanden

##### 4.1.2.3.1 Anzuwendende Grundlagen

Bei Tierversuchen ist es von großer Bedeutung, nur so viele Tiere zu verwenden, wie sie auch für aussagekräftige Ergebnisse benötigt werden (vgl. TierSchG 2006, TierSchVersV 2013). Nach dem Tierschutzgesetz ist also die Anzahl an Versuchstieren, die für statistisch abgesicherte Erkenntnisse notwendig sind, bereits im Zuge der Versuchsplanung zu ermitteln (vgl. Kap. 5). Um die Anzahl an Versuchstieren möglichst gering zu halten, muss überprüft werden, ob die mehrfache Verwendung von Probanden möglich ist. Hierbei gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die BfG wendet dazu beispielsweise das sog. Crossover-Design für ethohydraulische Untersuchungen an (SCHÜTZ & HENNING 2016). Beim Crossover-Design werden dieselben Versuchsgruppen bei unterschiedlichen Setups getestet. Dementsprechend kann eine Gewöhnung der Tiere an eine bestimmte Struktur weitestgehend ausgeschlossen werden, da die Probanden nicht mehrfach mit dem gleichen Setup konfrontiert werden.

Die Abb. 4-26 zeigt als Beispiel das 2x2 Crossover-Versuchsdesign der ethohydraulischen Tests der BfG (SCHÜTZ & HENNING 2016).

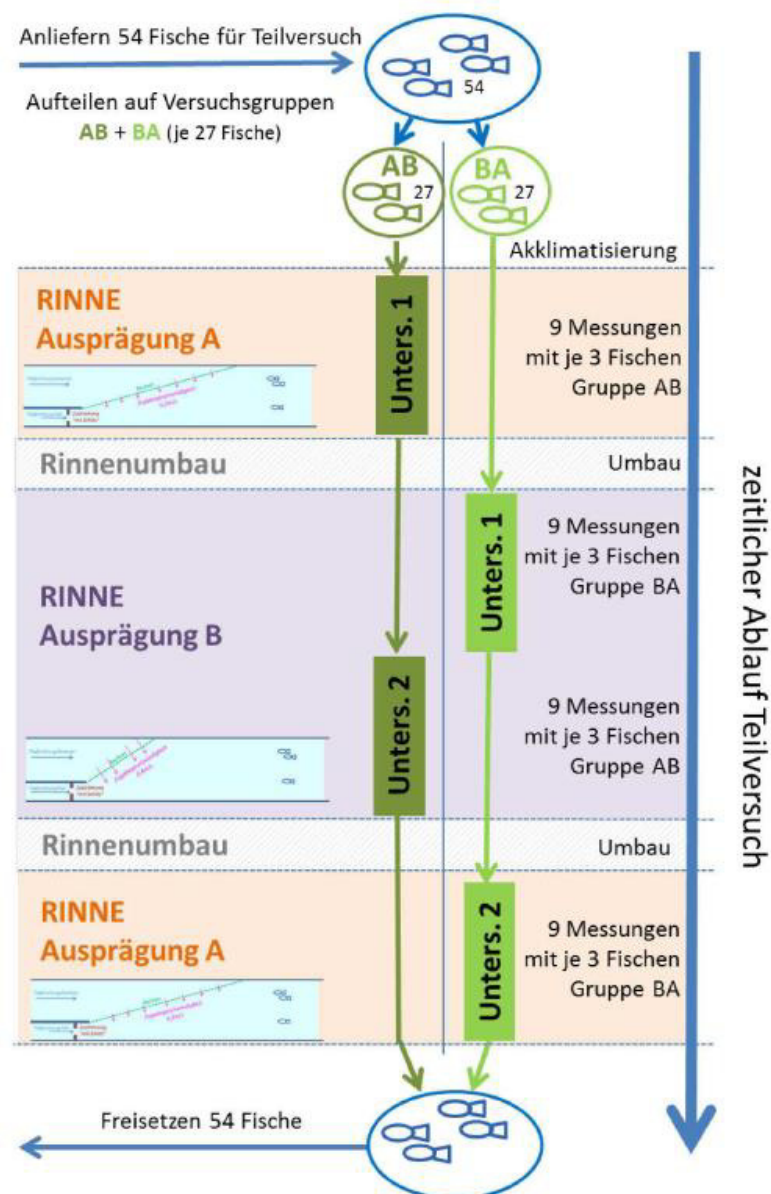


Abb. 4-26: Schematischer Überblick über den 2x2 Crossover-Versuchsverlauf der ethohydraulischen Tests des Bundesamtes für Gewässerkunde (Quelle: SCHÜTZ & HENNING 2016)

Ein Nachteil des Crossover-Designs sind jedoch sog. Sequenzeffekte. Im Falle von ethohydraulischen Untersuchungen können dies generelle Meidereaktionen sein, ausgelöst z. B. durch den Fang mit dem Kescher. Die Tiere, die im ersten Setup getestet wurden, besitzen dementsprechend bereits eine „Vorbelastung“, auch als Carry-Over-Effekt bezeichnet, wenn sie im zweiten Setup getestet werden. Ein weiterer möglicher Sequenzeffekt kann z. B. dann auftreten, wenn Fische, die im ersten Setup bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten getestet wurden, Ermüdungserscheinungen zeigen, die sich dann auf die Ergebnisse des zweiten Setups auswirken können.

Bei Mehrfachverwendungen besteht demnach die Gefahr, dass sich die eingesetzten Tiere in einem weiteren Versuchsdurchgang anders verhalten. So zeigten z. B. Untersuchungen von LEHMANN et al. (2016) ein nicht vergleichbares Verhalten durch



Gewöhnungseffekte bei mehrmaligem Einsatz von Lachssmolts. Auch aus ethohydraulischen Untersuchungen mit Aalen gibt es Hinweise, dass die Tiere den Versuchsstand wiedererkennen und aufgrund daraus resultierender Verhaltensweisen nicht mehrfach getestet werden sollten (BERGER 2018). Diese Erkenntnisse werden weiter durch eigene Beobachtungen gestützt (vgl. BÖCKMANN et al. 2015). Dies ist insofern problematisch, als dass speziell im Fall des selten gewordenen und unter Schutz stehenden Aals eine Mehrfachverwendung wünschenswert wäre.

Neben möglichen negativen Auswirkungen bei Mehrfachverwendung von Probanden (sinkende Aktivität) sind auch positive Effekte denkbar, z. B. durch eine Gewöhnung und damit bessere Orientierung in nachfolgenden Tests. So konnte z. B. SCHILLACK (2014) eine signifikant erhöhte Aktivität von Probanden mit wiederholter Verwendung der Tiere bei den ethohydraulischen Untersuchungen nachweisen.

Um Sequenzeffekte auszuschließen, ist es notwendig, statistische Tests durchzuführen, die zeigen, ob das beobachtete Verhalten reproduzierbar ist. Sofern man bei mehrfach unter gleichen Bedingungen beobachteten Tieren keine signifikanten Unterschiede im Verhalten zwischen den einzelnen Beobachtungen feststellen kann, ist davon auszugehen, dass keine Sequenzeffekte auftreten. Damit ist eine gemeinsame Auswertung der Daten wiederholt verwendeter Probanden zulässig. Finden sich jedoch signifikante Unterschiede, deutet dies auf Sequenzeffekte hin. Beispielsweise könnten die Fische das getestete Setup bzw. die Struktur bereits kennen und gelernt haben, dass das ethohydraulische Modell eine „Sackgasse“ ist und daher keinen erneuten Versuch unternehmen, die untersuchte Struktur zu passieren oder zu sondieren. Auch das Einfangen mittels Kescher könnte für die Probanden eine negative Erfahrung sein, so dass in einem wiederholten Versuch ein divergentes, evtl. meidendes Verhalten gezeigt wird. Treten Sequenzeffekte auf, sind die erhobenen Daten nur mit Vorbehalten auszuwerten.

Je nach Versuchsdesign und Fischart ist immer im Einzelfall zu entscheiden, ob Mehrfachtests zulässig sind. Die Durchführung von statistischen Tests zum Nachweis möglicher Sequenzeffekte ist auf der Grundlage der Befunde von SCHÜTZ & HENNING (2016) und eigenen Untersuchungen unumgänglich.

#### **4.1.2.3.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt**

Im Rahmen des OVeR-Projektes war es aufgrund der ausreichenden Verfügbarkeit von Lachssmolts und Rotaugen möglich, die Probanden einmalig zu testen und so Sequenzeffekte auszuschließen. Bei den Versuchen mit Blankaalen mussten die Probanden jedoch aufgrund der geringen Verfügbarkeit und des relativ hohen Aufwands der Hälterung solch großer Fische wiederholt getestet werden.

Im Rahmen einer Studie, in der es in erster Linie um die Auswirkungen der Wassertemperatur auf die Aktivität von Blankaalen ging (vgl. Kap. 4.1.3), wurde getestet, ob es bei Mehrfachverwendungen von Aalen zu Artefakten kommen kann. Die Studie wurde vom BUGeFi betreut und als flankierendes Projekt zum OVeR-Projekt durchgeführt (vgl. EICKERLING 2018, BÖCKMANN et al. 2018a). Um zu untersuchen, ob es beim

wiederholten Einsatz der Versuchstiere zu Artefakten durch evtl. Gewöhnungs- oder Wiedererkennungseffekte gekommen ist, wurden verschiedene Parameter ausgewertet und zwischen den einzelnen Versuchsdurchläufen auf signifikante Unterschiede getestet. Im Folgenden soll beispielhaft die von den Probanden benötigte Zeit bis zum Erreichen eines zuvor festgelegten Versuchsbereiches dargestellt werden (Abb. 4-27). Um Sequenzeffekte ausschließen zu können und somit Mehrfachverwendungen von Blanktaalen in dem gewählten ethohydraulischen Setup zu erlauben, sollte sich das beobachtete Verhalten zwischen den einzelnen Versuchsdurchläufen nicht signifikant voneinander unterscheiden. Insgesamt wurden 17 Aale in vier Versuchsdurchläufen unter gleichen Bedingungen getestet.

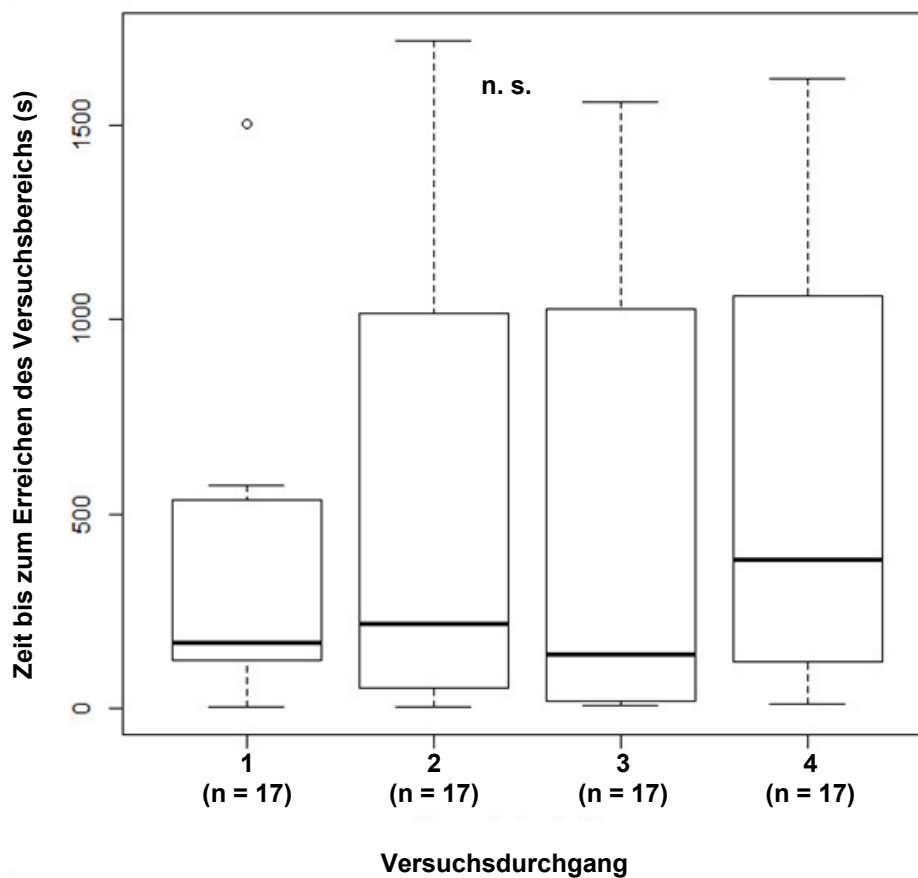


Abb. 4-27: Zeit bis zum erstmaligen Erreichen des Versuchsbereichs durch Aale in Abhängigkeit vom Versuchsdurchgang, dargestellt als Box-Whisker-Plots, n = Anzahl an Probanden, Kruskal-Wallis-Test auf Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsdurchgängen, n. s. = nicht signifikant bei  $p \geq 0,05$  (Quelle: EICKERLING 2018, verändert)

Abb. 4-27 zeigt, dass sich die Zeiten bis zum Erreichen des Versuchsbereiches im ethohydraulischen Versuchsstand innerhalb der vier Durchgänge nicht signifikant unterscheiden. Im Mittel erreichten die Fische beim ersten Einsatz in den Versuchsstand den Versuchsbereich nach 170 Sekunden; beim vierten Einsatz lag die Zeit bei 381 Sekunden.

In der statistischen Auswertung der wiederholten Versuchsdurchgänge konnte kein signifikanter Unterschied im Verhalten der mehrfach eingesetzten Probanden nachgewiesen werden. Im Rahmen der ethohydraulischen Untersuchungen zum OVeR-Projekt waren folglich keine Sequenzeffekte festzustellen, wonach eine Mehrfachverwendung der getesteten Aale zulässig war (vgl. EICKERLING 2018). Damit war eine gemeinsame Auswertung der Daten möglich. Wie viel Zeit bis zur erneuten Verwendung von Probanden mindestens liegen sollte, wurde bisher jedoch noch nicht quantitativ untersucht. Hier sind differenzierte Untersuchungen nötig.

#### **4.1.2.4 Stressverhalten**

##### **4.1.2.4.1 Anzuwendende Grundlagen**

Unter Stress versteht man die Reaktion eines Organismus auf einen oder mehrere spezielle Reize, die sog. Stressoren oder Stressfaktoren. Diese können unterschiedliche Ausprägungen besitzen. Auch Fische reagieren auf Belastungssituationen mit Stress. Hier sind verschiedene stressauslösende Faktoren bekannt, die jedoch je nach Fischart unterschiedlich sein können (HAMERS & SCHRECKENBACH 2002). So sind schlechte Umweltverhältnisse, zu hohe, aber auch zu niedrige Besatzdichten, eine unzureichende Wasserqualität oder das Handling und der Transport von Fischen als Beispiele zu nennen (vgl. HAMERS & SCHRECKENBACH 2002).

Um auf eine Belastung zu reagieren, werden als Antwort auf diesen Stressfaktor vom Gehirn und dem Rückenmark Stress- und Verhaltensreaktionen ausgelöst. HAMERS & SCHRECKENBACH (2002) unterscheiden zwischen primären Reaktionen, wie der Ausschüttung bestimmter Hormone, sekundären, z. B. physiologischen Reaktionen (erhöhte Atemfrequenz) und tertiären Reaktionen, die Veränderungen im Verhalten betreffen können. Länger anhaltende Stresssituationen können dabei einen Einfluss auf den Gesundheitszustand haben und damit unmittelbar zu Verhaltensänderungen führen. Für ethohydraulische Untersuchungen ist daher zu berücksichtigen, dass ein Proband bei langanhaltender Konfrontation mit einer Stresssituation womöglich kein arttypisches Verhalten mehr zeigt, was zu Fehlinterpretationen führen kann.

Im Rahmen einer projektbegleitenden Studie wurde das Stresslevel von Fischen während ethohydraulischer Versuche näher untersucht, indem im Anschluss an die Versuche der Lactat-Gehalt im Blut der Fische bestimmt wurde (GAYK 2012). Dabei wurden Hinweise gefunden, dass Fische während eines ethohydraulischen Versuchs Stress ausgesetzt sind. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass erhöhte Lactat-Werte auch auf Schwimmbewegungen der Tiere im Modell (erhöhte Muskelkontraktionen, Schwimmen bei erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten) zurückgeführt werden können (PUND 1997). Zielführender wären daher Untersuchungen zum Adrenalin- und Cortisol-Gehalt von Fischen (vgl. HAMERS & SCHRECKENBACH 2002). So zeigten beispielsweise Untersuchungen von PETERS (1979), dass Lachsartige, die Stresssituationen der täglichen Laboratoriums- und Fischereiroutine ausgesetzt wurden, erhöhte Cortisol-Konzentrationen aufwiesen.

Damit im Rahmen ethohydraulischer Tests das arttypische Verhalten von Fischen als Reaktion auf die zu untersuchende Variable beobachtet, aufgenommen und bewertet werden kann, müssen die Tiere so behandelt werden, dass die zu testende Verhaltensweise nicht stressbedingt verändert wird und neben Fang, Transport und Hälterung keinerlei zusätzliche Stressoren entstehen. Während der Hälterung vor Ort ist darauf zu achten, dass auch in den Wasserbaulaboren möglichst keine Störungen auftreten.

#### **4.1.2.4.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt**

Die Versuchstiere wurden im Rahmen des Moduls II nach Ankunft im Wasserbaulabor zunächst antemperiert und verblieben für einen Zeitraum von mindestens 16 Stunden bis hin zu vier Tagen zur Akklimatisierung an die neuen Bedingungen in den abgedunkelten und mit Sauerstoff versorgten Hälterungsbecken. Die Tiere wurden in keinem Fall am selben Tag der Ankunft getestet. Den Aalen wurden, entsprechend ihrer Lebensweise, in den Hälterungsbecken Deckungen angeboten.

#### **4.1.3 Chemisch-physikalische Grundlagen**

Im Folgenden wird ein Überblick über die wesentlichen chemisch-physikalischen Randbedingungen gegeben, die einen Einfluss auf das Verhalten von Fischen haben können und die daher im Rahmen ethohydraulischer Untersuchungen Berücksichtigung finden müssen.

##### **4.1.3.1 Wassertemperatur**

###### **4.1.3.1.1 Anzuwendende Grundlagen**

Die Wassertemperatur hat einen mehr oder weniger starken Einfluss auf die Aktivität der Versuchsfische. Bei Lachssmolts ist zu berücksichtigen, dass die Motivation zur Abwanderung im Freiland u. a. auch durch einen Anstieg der Wassertemperatur im Frühjahr auf über 10 °C getriggert wird (EBEL 2018). Im Gegensatz dazu ist beim Aal in erster Linie eine sinkende Wassertemperatur im Herbst sowie ein Anstieg des Abflusses von Bedeutung (TESCH 1999). Im Vergleich zu natürlichen Gewässern ist die Wassertemperatur in experimentellen Versuchsrinnen auch im Herbst vergleichsweise hoch, was ein möglicher Grund für die insgesamt eher geringe Motivation der Versuchsaale sein kann (s. Kap. 4.1.2.1). Analog dazu ist der durch den Betrieb der Pumpen verursachte Anstieg der Wassertemperatur im Modell für Lachssmolts eher motivationsfördernd.

Die Schwimmgeschwindigkeit von Fischen wird neben der Körperlänge und der Schwimmdauer maßgeblich von der Wassertemperatur bestimmt (vgl. EBEL 2014 und 2018). Darüber hinaus hat die Wassertemperatur einen direkten Einfluss auf physiologische Prozesse, z. B. auf die Embryonalentwicklung von Fischen. Je nach Fischart liegt das Temperaturoptimum in einem bestimmten Wertebereich, der bei Untersuchungen berücksichtigt werden muss. Eine umfassende Zusammenfassung der einzelnen Temperaturbereiche verschiedener Fischarten findet sich in BUGEFi et al. (2012). Im Rahmen des im Auftrag des Landes NRW durchgeführten Projektes wurden auf Grundlage einer umfangreichen Literaturrecherche artspezifische Steckbriefe erar-

beitet, welche die Temperaturansprüche von 29 in NRW vorkommenden Fischarten für verschiedene Entwicklungsstadien im Jahresverlauf darstellen. Die aufgeführten Temperaturbereiche berücksichtigen die Gewährleistung einer möglichst optimalen Fortpflanzung und Entwicklung der Fische. Insgesamt wurden für dieses Projekt 364 Literaturquellen gesichtet. Beispielhaft werden im Folgenden die Ergebnisse für die verschiedenen Temperaturansprüche einzelner Entwicklungsstadien für Lachs und Rotaugen dargestellt (Abb. 4-28). Die aufgeführten Temperaturbereiche können auch als Richtwerte für die Wassertemperatur bei ethohydraulischen Tests dienen.

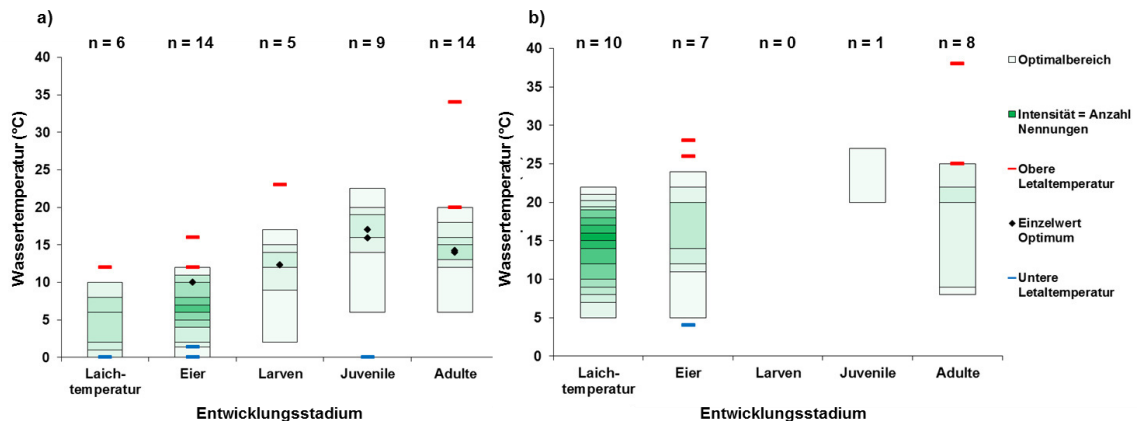


Abb. 4-28: Artspezifische Wassertemperaturansprüche für verschiedene Entwicklungsstadien von a) Lachs und b) Rotaugen, n = Anzahl ausgewerteter Literaturquellen (Quelle: BUGeFi et al. 2012)

#### 4.1.3.1.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt

Bei den ethohydraulischen Untersuchungen am IWW hat sich gezeigt, dass ein Anstieg der Wassertemperatur im Verlauf der Untersuchungen u. a. auf dem Wärmeeintrag der während der Untersuchungen dauerhaft in Betrieb befindlichen Pumpen beruht (BÖCKMANN et al. 2018b). Dementsprechend fand im Rahmen der Untersuchungen mit Lachssmolts und Rotaugen über Nacht regelmäßig ein Wassertausch statt. Dabei wurde die Wassertemperatur für die Untersuchungen mit Lachssmolts im Bereich des entsprechenden Temperaturoptimums gehalten. Die ethohydraulischen Tests wurden dabei im Mittel bei 15,8 °C durchgeführt (Minimum: 13,9 °C; Maximum: 17,3 °C) (vgl. BAUR et al. 2010, Abb. 4-28a). Bei den zu den Karpfenartigen zählenden Rotaugen, die etwas höhere Temperaturen tolerieren (BAUR et al. 2010), wurden die Untersuchungen im Mittel bei einer Wassertemperatur von 16,4 °C (Min: 13,4 °C; Max: 18,8 °C) durchgeführt (vgl. auch Abb. 4-28b).

Für die Untersuchungen mit Blankkaalen im Winter 2017/18 war es nicht möglich, angemessene Wassertemperaturen (ca. 10 bis 12 °C) über einen regelmäßigen Wassertausch zu realisieren. Daher wurde eine Kühlanlage (Modell TAE EVO tech 161, Rehler Kühlsysteme GmbH) in der Wasserbauhalle des IWW installiert (Abb. 4-29). Diese ermöglichte eine konstante Einhaltung der für die ethohydraulischen Untersuchungen benötigten Wassertemperatur. Die Tests wurden im Mittel bei 11 °C (Min: 9,8 °C; Max: 12,2 °C) durchgeführt.



Abb. 4-29: Kühlanlage (Modell TAE EVO tech 161, Rehler Kühlsysteme GmbH) in der Wasserbauhalle des IWW, RWTH Aachen, University

Inwieweit die Wassertemperatur einen Einfluss auf die Aktivität von Blankaalen in Modellversuchen hat, wurde im Rahmen von OVeR in einer projektbegleitenden Studie untersucht (EICKERLING 2018). Dazu wurde die Aktivität der Probanden bei zwei verschiedenen Temperaturbereichen miteinander verglichen. Im ersten Setup wurden Blankaale bei einer Wassertemperatur von durchschnittlich 11 °C getestet, im zweiten Setup lag die Temperatur im Mittel bei 16 °C. Als Maß für die Aktivität der Aale wurden unter anderem die Anzahl an Bereichswechseln innerhalb des Versuchsbereiches sowie die Zeit bis zum Erreichen des getesteten Abstiegswegs ausgewertet. Abb. 4-30 zeigt die mittlere Zeit bis zum Erreichen des „Zielbereiches“ bei niedrigen und hohen Wassertemperaturen.

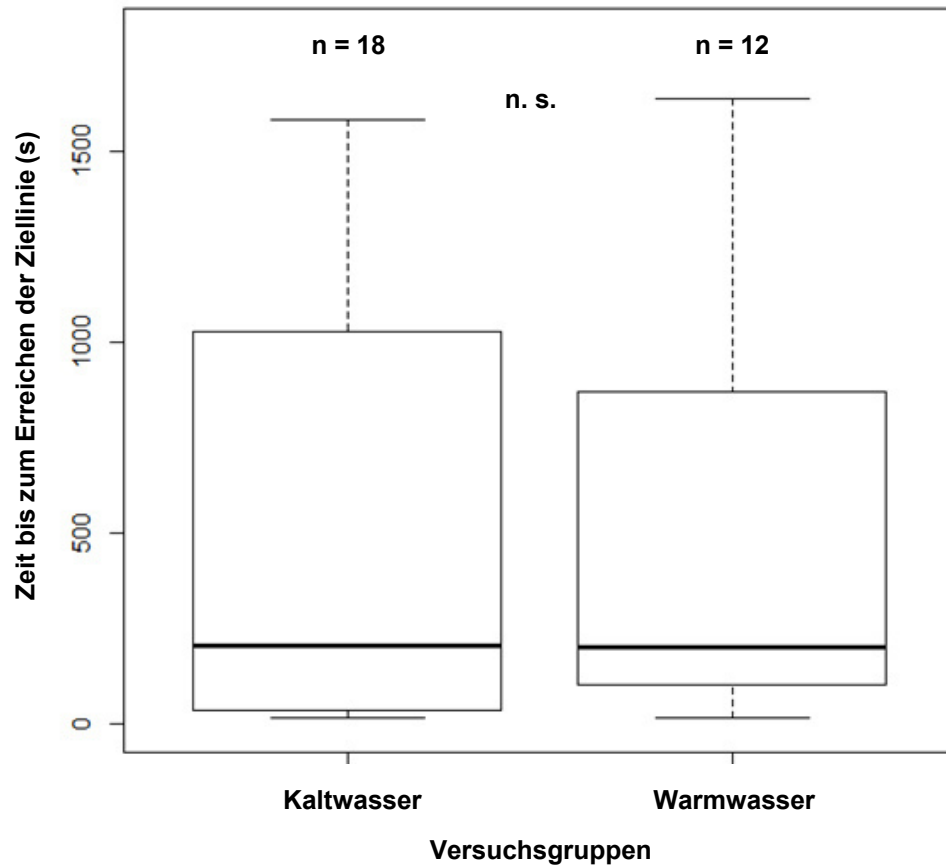


Abb. 4-30: Zeit bis zum Erreichen des Zielbereiches durch Aale in Abhängigkeit von der Wassertemperatur, dargestellt als Box-Whisker-Plots, n = Anzahl an Probanden, U-Test, auf Unterschiede zwischen Kalt- und Warmwasser, n. s. = nicht signifikant bei  $p \geq 0,05$  (Quelle: EICKERLING 2018, verändert)

Abb. 4-30 zeigt, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden getesteten Setups gibt. Dementsprechend hat die Wassertemperatur im Labortest keinen signifikanten Einfluss auf die Zeit bis zum Erreichen des Abstiegsweges. Bei niedrigeren Temperaturen wurde dieser im Mittel nach 207 Sekunden erreicht, bei höheren Temperaturen im Mittel bei 201 Sekunden.

Abb. 4-31 stellt die Anzahl der Bereichswechsel der getesteten Blankaale bei den zwei verschiedenen Setups dar.

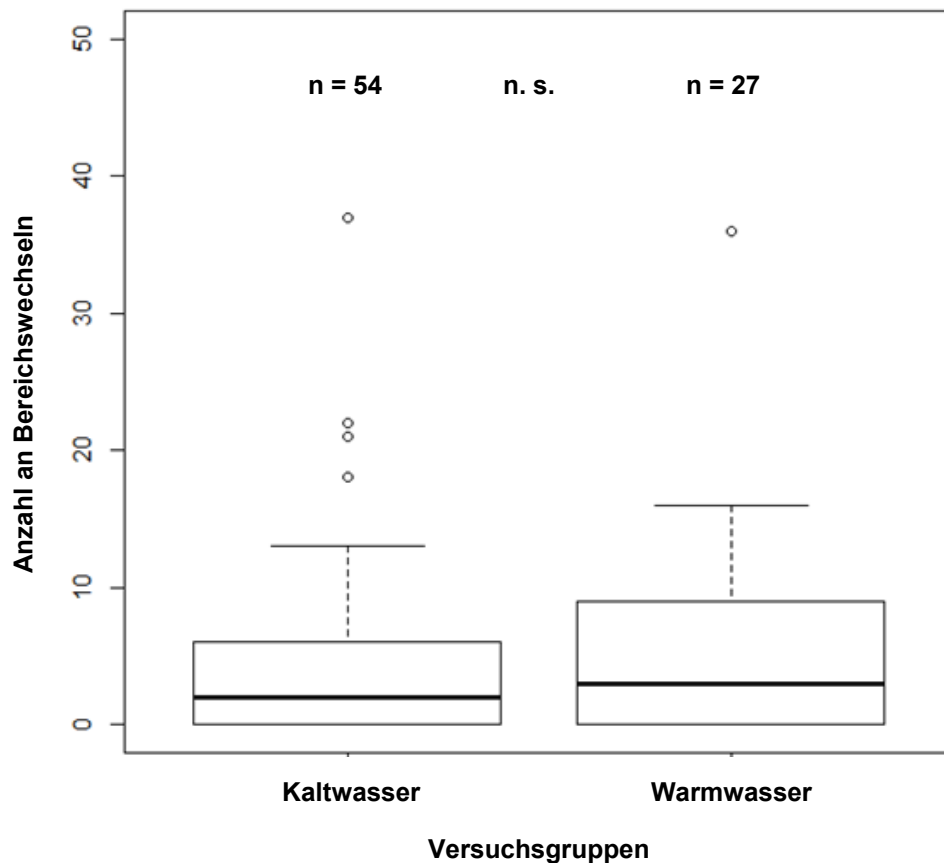


Abb. 4-31: Anzahl an Bereichswechseln für Aale in Abhängigkeit von der Wassertemperatur, dargestellt als Box-Whisker-Plots, n = Anzahl getesteter Aale, stat. Test: U-Test auf Unterschiede zwischen Kalt- und Warmwasser, n. s. = nicht signifikant bei  $p \geq 0,05$  (Quelle: EICKERLING 2018, verändert)

Im Falle der Bereichswchsel zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den getesteten Setups. Dementsprechend war die insgesamt geringe Aktivität der getesteten Blankaaale nicht abhängig von den getesteten Wassertemperaturen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der aufgeführten Studie, dass hier die Wassertemperatur keinen signifikanten Einfluss auf die Aktivität bzw. Abwandermotivation der Blankaaale im Modell hatte und damit für ethohydraulische Versuche nicht operationalisierbar ist (EICKERLING 2018). Das passive Verhalten erweist sich bei ethohydraulischen Untersuchungen mit Blankaaalen weiterhin als problematisch. Für einen abgesicherten wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn wird demnach eine höhere Anzahl an Versuchstieren benötigt, was höhere Kosten und einen höheren Arbeitsaufwand bedeuten. Neben der Wassertemperatur ist es auch denkbar, dass weitere äußere Faktoren für passives Verhalten der Blankaaale verantwortlich sind. Es ist daher zu diskutieren, ob neue Konzepte bei den Untersuchungen mit Aalen (Wassertemperaturmanagement, längere Hälterungsdauer, Tageszeit etc.) entwickelt werden müssen.

Der Einsatz eines Kühlsystems für ethohydraulische Tests ist in jedem Fall ein sinnvolles Instrument, da so unter standardisierten Wassertemperaturen gearbeitet werden



kann und eine Einstellung artspezifischer Temperaturoptima (vgl. Abb. 4-28) möglich ist.

#### **4.1.3.2 Weitere chemisch-physikalische Wasserparameter**

##### **4.1.3.2.1 Anzuwendende Grundlagen**

Neben der Wassertemperatur sind weitere chemisch-physikalische Parameter, wie der pH-Wert sowie der Sauerstoffgehalt zu berücksichtigen, die im Vorfeld der Arbeit mit Fischen detailliert studiert werden müssen. Detaillierte Angaben zu den artspezifischen Ansprüchen in Bezug auf verschiedene Gewässerparameter, wie z. B. pH-Wert, Sauerstoffgehalt des Gewässers etc. finden sich u. a. in JENS (1980) oder BAUR et al. (2010). Darüber hinaus gibt die *Richtlinie über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten (RL 2006/44/EG 2006)* der Europäischen Union wichtige Angaben zur Gewässerqualität. Hier finden sich dezidierte Angaben zu verschiedenen Parametern und deren Grenzwerten zur Sicherung einer guten Gewässerqualität für Fische, die natürlich auch auf Hälterungsbedingungen anzuwenden sind.

##### **4.1.3.2.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt**

Bereits im Rahmen des Tierversuchsantrages zum OVeR-Projekt wurde eine Liste mit Grenzwerten der chemisch-physikalischen Wasserparameter auf der Grundlage von Expertenwissen und Literaturangaben erarbeitet, in deren Bereich sich die Wasserqualität befinden musste. Die jeweiligen Parameter wurden mittels Messsonden überwacht und bei Abweichungen wurde ein automatischer Alarm per E-Mail an die jeweiligen für die Pflege der Fische beauftragten Personen herausgegeben. Ein Softwareprogramm gab einen Überblick über die aktuellen Messwerte (Abb. 4-32). Tab. 4-4 gibt einen Überblick über die im OVeR-Projekt vorherrschenden Werte. Bei den Werten handelt es sich um Richtwerte, die zu Beginn des Projektes unter fachlicher Beratung durch Fischereiwirtschaftsmeister abgestimmt wurden. Bei allen ethohydraulischen Untersuchungen sollten die Werte jeweils vor dem Hintergrund der aktuellen Literatur festgelegt werden.

Tab. 4-4: Überblick über verschiedene Wasserqualitätsparameter mit entsprechendem Wertebereich für das OVeR-Projekt

Qualitätsparameter	Wertebereich
Sauerstoffsättigung	80 bis 100 %
Sauerstoffgehalt	6,0 – 11,0 mg/l
pH-Wert	6,5 – 8,5
Ammonium	bis 0,3 mg/l
Nitrat	bis 40 mg/l
Nitrit	bis 0,04 mg/l
Eisen	bis 0,3 mg/l



Abb. 4-32: Überwachungsmonitor mit Anzeige der wesentlichen Wasserqualitätsparameter (pH-Wert, Sauerstoffgehalt und Wassertemperatur) für die ethohydraulischen Untersuchungen im OVeR-Projekt

#### 4.1.4 Tierschutzrechtliche Grundlagen

In den folgenden Abschnitten werden die ethohydraulisch relevanten tierschutzrechtlichen Grundlagen behandelt.

Vorab sei darauf hingewiesen, dass für das Einholen der im Folgenden beschriebenen Genehmigungen ausreichend Zeit eingeplant werden muss. Erfahrungen aus eigenen ethohydraulischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verfahren eine hohe Zeitintensität aufweisen.

##### 4.1.4.1 Anzuwendende Grundlagen

###### Antrag auf Genehmigung eines Tierversuchsvorhabens

Zur Durchführung von Tierversuchen im Zuge ethohydraulischer Untersuchungen ist eine Genehmigung gemäß § 8 Abs. 1 des Tierschutzgesetzes (TierSchG) und der Tierschutz-Versuchstierverordnung (TierSchVersV) bei der zuständigen Behörde einzuholen. Hintergrund ist die Umsetzung der europäischen *Richtlinie zum Schutz der für wissenschaftliche Zwecke verwendeten Tiere (2010/63/EU)* vom 22.09.2010 in nationales Recht. Die Bearbeitung des Genehmigungsantrages ist dabei in enger Zusammenarbeit mit einem/einer Tierschutzbeauftragten durchzuführen.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens ist eine genaue Erläuterung des Versuchsvorhabens notwendig. Dabei sind der Zweck der Untersuchungen und eine detaillierte wissenschaftliche Begründung aufzuführen. Auch die Versuchsplanung und -durchführung sind dabei von Bedeutung. Gemäß § 31 Abs. 1 Nr. 1c TierSchVersV ist die vorgesehene Anzahl an Versuchstieren mit einer entsprechenden Begründung zu benennen.

Nach Einreichung des Antrages wird dieser durch eine Tierschutzkommission der zuständigen Behörde auf Unerlässlichkeit und die ethische Vertretbarkeit geprüft. Die Beurteilung erfolgt dabei unter anderem nach dem „3R-Prinzip“ (Replacement, Reduction, Refinement), das darauf abzielt, die Verwendung von Tieren zu wissenschaftlichen Zwecken zu vermeiden, zu vermindern oder zu verbessern. Die Tierschutzkommission besteht u. a. aus wissenschaftlich beratenden Personen mit einem naturwissenschaftlichen Hochschulstudium (Veterinärmediziner, Biologen etc.) und Vertretern von Tierschutzorganisationen. Treten im Verlauf der Untersuchungen Änderungen im Versuchsablauf, der Durchführung oder dem Versuchsaufbau auf, ist eine Änderungsanzeige an die Behörde zu stellen, die ebenfalls genehmigt werden muss.

###### Hälterungsgenehmigung

Bei ethohydraulischen Untersuchungen müssen vor Ort Hälterungsanlagen für die Fische zur Verfügung stehen. Für die Hälterung der Versuchstiere ist im Vorfeld der Untersuchungen ein *Antrag auf Erteilung einer Erlaubnis für das Züchten und Halten von Versuchstieren gemäß § 11 Abs. 1 Nr. 1a und 1b und 2 TierSchG* zu stellen. Die Erlaubnis ist von den zuständigen Ämtern für Verbraucherschutz, Tierschutz und Veterinärwesen einzuholen.

Im Rahmen des Antrages ist der Aufbau und die Position der Hälterungsanlage in der Versuchshalle sowie die Art und Anzahl der zu hälternden Fische zu beschreiben. Darüber hinaus ist im Antrag eine geeignete Überwachungstechnik zu nennen, die über Fehlfunktionen und Ausfälle von Anlagenteilen und über Abweichungen der Wasserparameter von den festgelegten Grenzwerten informiert.

Konkrete Hinweise zu angemessenen Fischdichten bei der Hälterung finden sich in ADAM et al. (2013).

#### Weitere Genehmigungen

Bei den Versuchsfischen, die für ethohydraulische Untersuchungen genutzt werden, handelt es sich in der Regel um Wildfische. Zur Entnahme aus der Natur wird vornehmlich auf die Elektrofischerei zurückgegriffen, welche einer Genehmigung bedarf. In Nordrhein-Westfalen wird diese Genehmigung von den Kreisen bzw. kreisfreien Städten erteilt (Untere Fischereibehörde). Darüber hinaus sind die Fischereigenossen-schaften sowie die Fischereiberechtigten mit in die Befischung einzubeziehen. Handelt es sich um geschützte Arten oder solche, die einer Schonzeit oder einem für die Entnahme erforderlichen Mindestmaß unterliegen, ist zusätzlich eine Ausnahmegenehmigung von den jeweils zuständigen Bezirksregierungen einzuholen (Obere Fischereibehörde).

#### Beschaffung und Freilassen der Versuchstiere

Die Beschaffung von Versuchstieren im Rahmen ethohydraulischer Untersuchungen erfordert eine gute Vernetzung mit Institutionen, bei denen die Tiere zwischengehändert werden können, wenn zwischen der Beschaffung und den Tests eine zeitliche Differenz besteht. Die Beschaffung von Versuchstieren erfordert einen hohen logistischen Aufwand und muss frühzeitig vor den Untersuchungen geplant werden. Auch das Freilassen bzw. wieder zurück in das ursprüngliche Gewässer verbringen, erfordert zusätzliche Genehmigungen der zuständigen Behörden (Fischereidezernenten, obere und untere Fischereibehörden, Landesbehörden).

#### **4.1.4.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt**

Der *Antrag zur Durchführung von Tierversuchen* im OVeR-Projekt wurde am 17.04.2015 vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen genehmigt. Die Genehmigung ist für eine Dauer von 5 Jahren gültig.

Weiter wurde beim Amt für Verbraucherschutz, Tierschutz und Veterinärwesen der StädteRegion Aachen ein *Antrag auf Zulassung einer Ausnahmegenehmigung nach § 19 Abs. 1 Satz 2 und § 20 Abs. 1 TierSchVersV zur Verwendung von aus der Natur entnommenen Fischen* gestellt, da im Rahmen der OVeR-Untersuchungen Wildfische als Versuchstiere verwendet wurden.

Zusätzlich wurde ein *Antrag auf Erteilung der Erlaubnis für das Züchten und Halten von Versuchstieren gemäß § 11 Abs. 1 Nr. 1a und 1b und 2 TierSchG*, in der Neufassung vom 04.07.2013, beim Veterinäramt der StädteRegion Aachen gestellt (16.04.2015).

Im Verlauf der Untersuchungen wurden verschiedene Änderungsanträge für Modifikationen des Untersuchungsmoduls II (zusätzliche Bypassrinne, Aufstocken der Tierzahlen, Verlängerung der Hälterungserlaubnis, zusätzliche Entnahmegewässer) gestellt und genehmigt.

Die Anträge wurden in enger Zusammenarbeit mit der Tierschutzbeauftragten der RWTH Aachen University und den Mitarbeitern des Veterinäramtes der StädteRegion Aachen gestellt.

## **4.2 Vorversuche zur weiteren Optimierung des Versuchs-Setups**

Kapitel 4.2 beschreibt den Schritt der Vorversuche zur projektspezifischen Optimierung der angewendeten Grundlagen.

### **4.2.1 Anzuwendende Grundlagen**

Nach Umsetzung der in Kap. 4.1 dargestellten ethohydraulisch relevanten Aspekte ist es zwingend erforderlich, Vorversuche durchzuführen; dies zeigen unter anderem eigene Erfahrungen aus vergangenen Projekten (KIT & BUGEFI 2012, BÖCKMANN et al. 2015). Primäres Ziel der Vorversuche ist es, festzustellen, ob die beobachtbaren Reaktionen der Fische klar auf den zu untersuchenden Faktor zurückgeführt und andere Ursachen ausgeschlossen werden können. Nur wenn diese Bedingung erfüllt ist, können später Aussagen über den Zusammenhang zwischen einem bestimmten Reiz und der Reaktion auf diesen getroffen werden. Derartige Vorversuche dienen also als Instrument zur Einrichtung und Überprüfung der grundlegenden Funktionalität des gewählten Setups.

Vorversuche zu ethohydraulischen Untersuchungen erfolgen immer auf qualitativer Ebene. Wie oben bereits beschrieben, ist es im Rahmen von Vorversuchen möglich, auch (größere) Gemischtgruppen zu testen, da noch keine quantitativen Daten aufgenommen werden und Gruppenzusammensetzung und -größe von untergeordneter Bedeutung sind. Anhand von Beobachtungen des Verhaltens der Fische (z. B. Meideverhalten etc.) kann das Vorhandensein möglicher versuchsbeeinflussender Faktoren festgestellt werden. Da es in bestimmten Verhaltensweisen artspezifische Unterschiede gibt, müssen Vorversuche mit allen zu testenden Fischarten durchgeführt werden, um das Setup artspezifisch anpassen zu können. Darüber hinaus dienen Vorversuche dazu, den Umgang mit den Probanden sowie den Versuchsablauf zu erproben und die Datenaufnahme zu testen.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Vorversuche sind numerische Simulationen und physikalische Messungen, um schon vor den Hauptversuchen mögliche Beeinträchtigungszonen oder -faktoren (z. B. Turbulenzen, Wirbelzonen o. ä.) zu erkennen und diese zu eliminieren oder in die Ergebnisbewertung mit einzubeziehen. Abb. 4-33 zeigt beispielhaft eine hydrodynamisch-numerische Strömungsmodellierung, die im Rahmen des Baldeney-Projektes (Auftraggeber: Ruhrverband) durchgeführt wurde (BÖCKMANN et al. 2015). Dabei wurden verschiedene Betriebsszenarien simuliert, um eine möglichst dominante Leitströmung im Bereich des Vorkammerschlitzes zur besseren Auffindbarkeit der Aufstiegsanlage sowie einen möglichst kontinuierlichen Strömungspfad

in Richtung der Lifte zu erreichen. Die hydrodynamisch-numerischen Simulationen dienten außerdem dazu, die Ausrichtung der Lifteinstiege im Vorfeld der ethohydraulischen Untersuchungen zu optimieren. Abb. 4-34 zeigt das physikalische Modell des Fischliftsystems im Karlsruher Wasserbaulabor, das u. a. zur Validierung der numerischen Simulationsergebnisse diente. Auf der Grundlage der Simulationen im Vorfeld der ethohydraulischen Tests ist es möglich, die Anzahl an Untersuchungen durch das Ausschließen möglicher Varianten, die aus fischökologischer Sicht nicht zielführend sind, herabzusetzen.

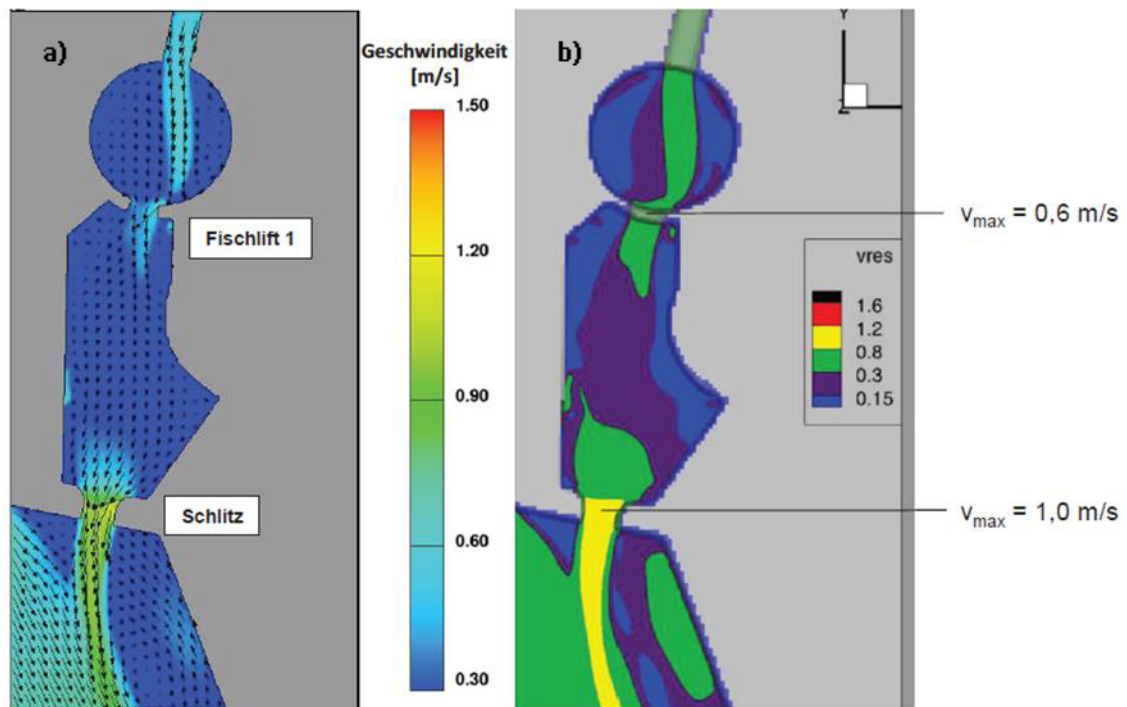


Abb. 4-33: Hydrodynamisch-numerische Simulation der a) Fließgeschwindigkeiten und Fließvektoren sowie der b) ethohydraulischen Signatur des Fischliftsystems im Baldeney-Projekt bei geöffnetem Fischlift ( $Q_{\text{Lift}} = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Quelle: BÖCKMANN et al. 2015)

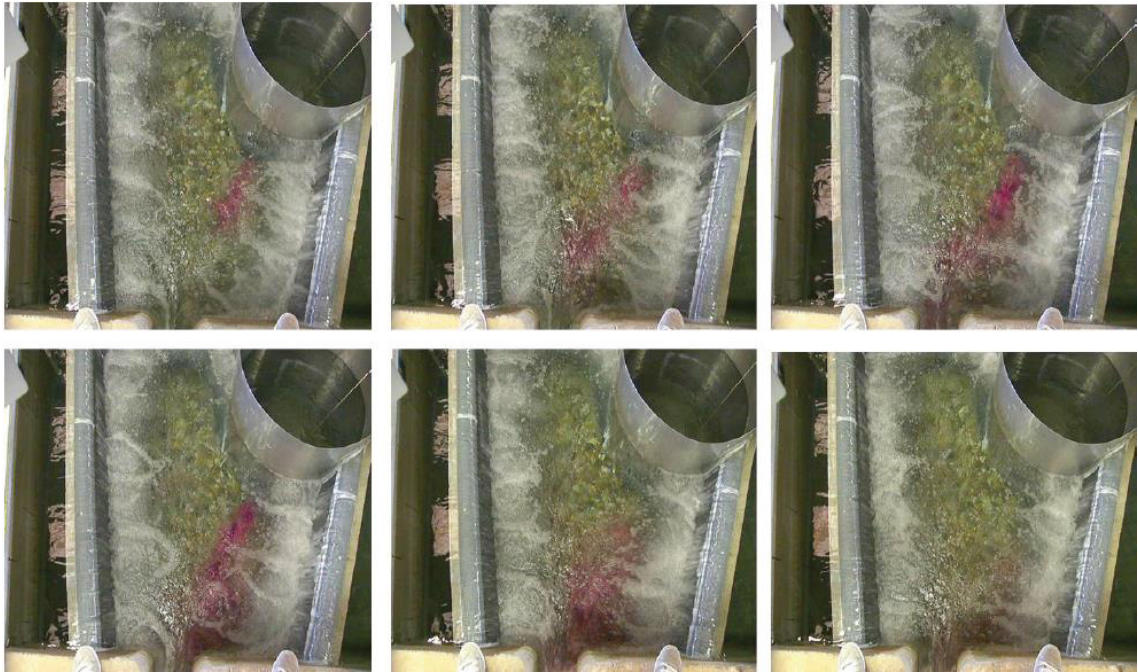


Abb. 4-34: Physikalisches Modell im Maßstab 1:3 des Fischliftsystems Baldeney, Momentaufnahmen der Strömung mit Tracer (rote Flüssigkeit) (Quelle: BÖCKMANN et al. 2015)

#### 4.2.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt

Nach Anwendung der in Kap. 4.1 beschriebenen Kriterien wurde im Rahmen des Moduls II des OVeR-Projektes zunächst die gesamte Strömungssituation im Versuchsbereich von Experten fachlich bewertet. Dazu wurde die Rinne zunächst geflutet, wobei noch keine Untersuchungen mit Fischen stattfanden. Im Bereich der Bypass-Abzweigung zeigten sich dabei einige ungünstige Strömungsablösungen an der eckigen Geometrie des Einlaufbereiches (Abb. 4-35a, roter Rahmen). Zur Eliminierung dieses Problems wurden Strömungsleitelemente zur Abrundung der Kanten eingebaut (Abb. 4-35b-c). Darüber hinaus ermöglichte ein wellenförmiges Strömungsleitelement ein gleichmäßiges Einströmen in den Bypass (Abb. 4-35d).



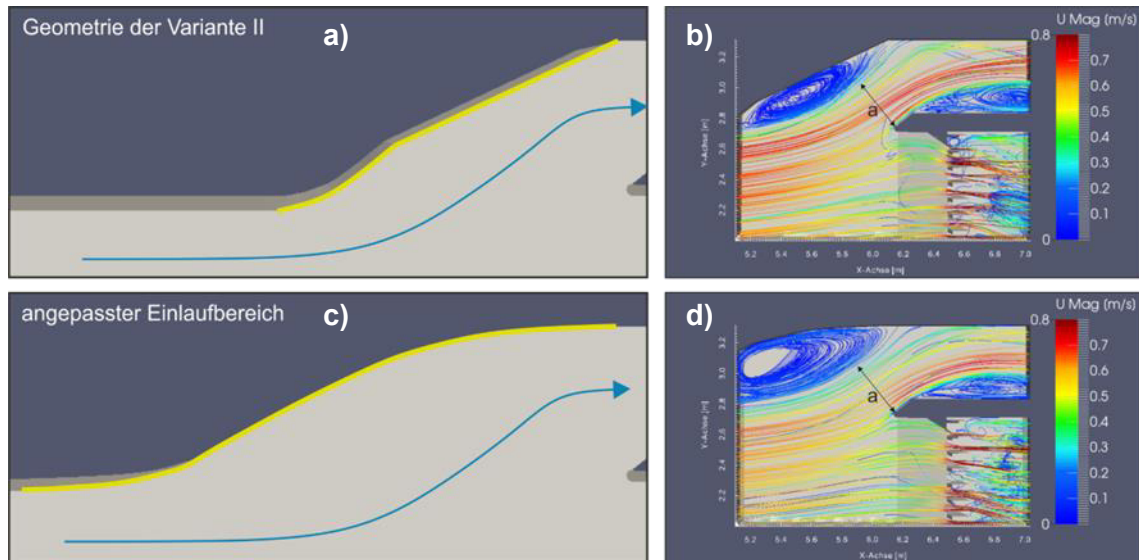


Abb. 4-35: Versuchsrinne im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (Modul II, OVeR), a) Abzweig zum seitlichen Bypass vor Modifikation, der rote Rahmen weist auf die Bereiche hin, an denen sich Strömungsablösungen bildeten, b) Abzweig zum seitlichen Bypass nach Modifikation, c) abgerundete Kante im Einlaufbereich des Bypasses, d) wellenförmiges Strömungsleitelement (links) sowie abgerundete Kante im Einlaufbereich des seitlichen Bypasses (Fotos: IWW Aachen, verändert)

Zur Bewertung bzw. strömungstechnischen Optimierung der Strömungsverhältnisse wurden Strömungsmessungen und hydrodynamisch-numerische Untersuchungen der Geometrien im Bereich des Bypasses sowie vor dem Rechen durchgeführt. Abb. 4-36



zeigt zwei Varianten möglicher Geometrien im Bereich des Bypasseingangs. Abb. 4-36a-b stellt die für die späteren ethohydraulischen Hauptversuche gewählte Variante dar, Abb. 4-36c-d zeigt, dass durch eine Anpassung des Einlaufbereiches eine größere Wirbelzone und damit ein größerer Totwasserbereich entstehen würde, der sich nachteilig auf die Annahme des Bypasses durch die Fische auswirken würde (vgl. Kap. 4.1.1.2). Gleiches gilt für die Leitströmung, die sich im Falle der hier vorgeschlagenen Anpassung (Abb. 4-36c-d) verringern würde. An diesem Beispiel wird der große Nutzen von numerischen Simulationen im Vorfeld von baulichen Veränderungen deutlich.



Simulations were performed with computing resources granted by RWTH Aachen University under project thes0303.

Abb. 4-36: Darstellung zweier Geometrien des Eingangsbereichs des seitlichen Bypasses im Modul II des OVeR-Projekts (Aufsicht). a) Schema der gewählten Variante für die ethohydraulischen Hauptversuche sowie b) dazugehörige numerische Simulation; c) Schema der Variante mit angepasstem Einlaufbereich und dadurch nachteiliger vergrößerter Wirbelzone sowie d) dazugehörige numerische Simulation (Quelle: BÖCKMANN et al. 2018a)

Abb. 4-37 und Abb. 4-38 zeigen beispielhaft Ergebnisse von Strömungsmessungen mittels ADV<sup>18</sup>-Sonden, die einen Überblick über die räumlichen Strömungsverteilungen im Modell ermöglichen. Die Abbildungen visualisieren neben der Verteilung auch die Intensität der Strömung und lassen Bereiche mit Strömungsschatten erkennen. Abb. 4-38 beinhaltet zusätzlich die Darstellung der Strömungsvektoren, die Strömungsumlenkungen kenntlich machen. So können beispielsweise Aussagen darüber getroffen werden, wie weit sich die Querströmung, die durch den Bypass entsteht, in die Hauptströmung ausprägt.

<sup>18</sup> Acoustic Doppler Velocimeter: Messgerät zum Messen der Strömungsgeschwindigkeit in drei Raumrichtungen

Über den ethohydraulischen Verschnitt lassen sich Zusammenhänge zwischen Fischverhalten und Strömungsverhältnissen ermitteln (vgl. 2.2.1).

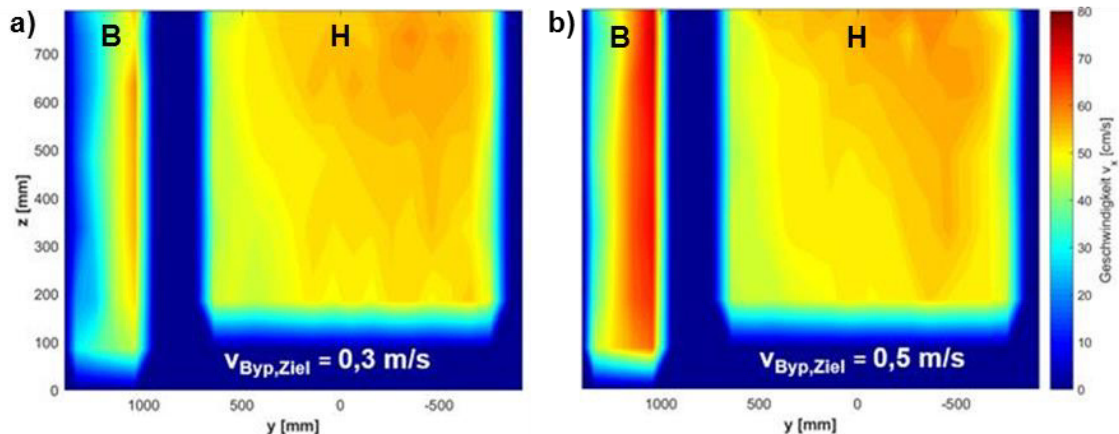


Abb. 4-37: Ergebnisse der ADV-Messungen in Form eines vertikalen Querschnittes bei Strömungsgeschwindigkeiten von a) 0,3 und b) 0,5 m/s im Bypass (B) und der Hauptrinne (H) im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (Modul II, OVeR-Projekt, Quelle: BÖCKMANN et al. 2018b, verändert)

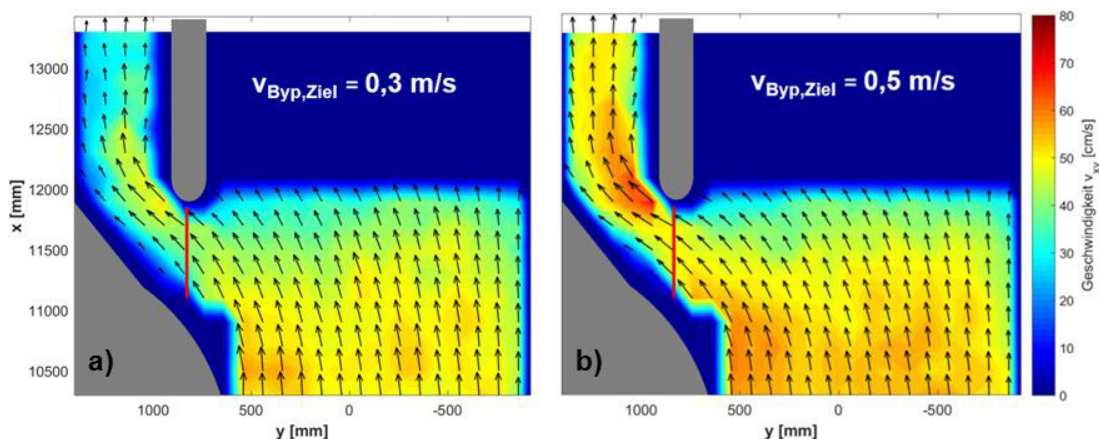


Abb. 4-38: Ergebnisse der ADV-Messungen in Form eines horizontalen Schnittes, die rote Linie kennzeichnet die Position der Strömungsmessung im Bypasseingang der Versuchsrinne im Wasserbaulabor der RWTH Aachen für a) 0,3 m/s und b) 0,5 m/s (Modul II, OVeR-Projekt, Quelle: BÖCKMANN et al. 2018a, verändert)

Nach Umsetzung der o. g. Modifikationen starteten die ethohydraulischen Vorversuche mit Einsatz von Fischen. Dabei wurde zunächst ein Rechen mit einem Stababstand von 10 mm getestet (vgl. BÖCKMANN et al. 2018b). Dieser Rechen war von den Versuchsfischen physisch nicht zu passieren. Die Fische konnten dementsprechend nur in den Bypass einschwimmen oder in der Hauptrinne vor dem Rechen bleiben. Dies ermöglichte Aussagen darüber, ob der Bypass generell von den Fischen angenommen wird. So konnten die zuvor auf hydrodynamischer Ebene optimierten Strukturen auf ihre tatsächliche Funktionalität hin getestet werden. Im Falle eines Einschwimmens der Fische in den Bypass konnte demnach ausgeschlossen werden, dass möglicherweise noch vorhandene Störfaktoren die Annahme des Bypasses durch die Fische verhindert hätten.

Bei den ersten Vorversuchen mit Lachssmolts zeichnete sich ab, dass der Rechen zu weit im Unterwasser installiert war (Abb. 4-39a). Da Lachssmolts bei der Abwanderung der Hauptströmung folgen, sondierten die Probanden zunächst den Rechen. Da jedoch direkt am Rechen keine Abstiegsmöglichkeit bestand, mussten die Smolts eine kurze Strecke zurück in Richtung Oberwasser schwimmen, um in den seitlichen Bypass zu gelangen. Derartige zeitliche Verzögerungen könnten im Freiland, wo während des Abstiegs eine Vielzahl an Querbauwerken zu überwinden ist, kumulativ den Abstieg erschweren. Bei einer räumlich engeren Anordnung von Rechen und Bypass wird ein schnelleres Auffinden der Abstiegsmöglichkeit wahrscheinlicher. Im Rahmen von Umbaumaßnahmen wurde der Rechenfuß daher näher an die Öffnung des Bypasses gesetzt (Abb. 4-39b). Zur Funktionsüberprüfung wurden sechs weitere Vorversuche mit Lachssmolts durchgeführt, welche die angenommene verbesserte Auffindbarkeit bestätigten.

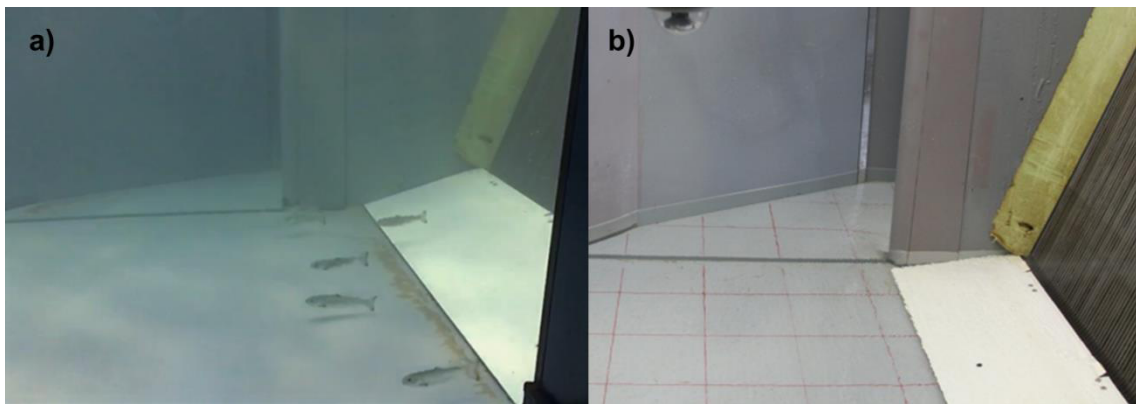


Abb. 4-39: Position des Fischschutzrechens im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt) a) vor Verlegung in Richtung Oberwasser mit Lachssmolts und b) nach Verlegung in Richtung Oberwasser

Analog zu den Lachssmolts wurden im Modul II des OVeR-Projektes Vorversuche mit Aalen und Rotaugen durchgeführt. Hierbei bestätigte sich die Vorgehensweise bei den Versuchen wie sie für die Lachse erprobt wurde.

### **4.3 Hauptversuche**

Dieses Kapitel stellt die Vorgehensweise bei den Hauptversuchen dar und beschäftigt sich in erster Linie mit der Aufnahme ethohydraulisch zählbarer Ereignisse und der statistischen Auswertung dieser Daten. Darüber hinaus wird die im Rahmen des OVeR-Projektes entwickelte Analyse-Software dargestellt.

In den Hauptversuchen wurde die Attraktivität eines Bypasses im Vergleich zum Durchschwimmen eines Rechens untersucht. Bereits im Rahmen der Vorversuche, die im OVeR-Projekt durchgeführt wurden, konnte eine funktionsfähige Geometrie in Form eines seitlichen Bypasses erarbeitet werden (vgl. Kap. 4.2), welche die untersuchten Fische generell als Abstiegsweg annahmen. Die Vorversuche ermöglichten es, die beobachteten Reaktionen der Fische klar auf einen zu untersuchenden Faktor (hier: Stababstand bzw. Strömungsgeschwindigkeit im Bypasseingang) zurückzuführen und andere verhaltensbeeinflussende Randfaktoren (z. B. Wirbel, Turbulenzen, Schattenwurf, Wassertemperatur) auszuschließen. Im Rahmen der Hauptversuche wurde den Probanden die Möglichkeit gegeben, alternativ zum Bypass auch durch einen ihnen physisch passierbaren Rechen zu schwimmen, wobei zwischen drei verschiedenen Stababständen (20, 40 und 60 mm) unterschieden wurde. Darüber hinaus wurde der Einfluss verschiedener Strömungsgeschwindigkeiten im Bypasseingang (0,3 und 0,5 m/s) auf die kleinräumige Auffindbarkeit und Akzeptanz des Bypasses im Modell untersucht.

#### **4.3.1 Versuchsablauf - Anzuwendende Grundlagen und deren Anwendung auf das OVeR-Projekt**

Im Laufe verschiedener eigener Projekte konnte ein bestimmtes Prozedere für den Ablauf ethohydraulischer Versuche erarbeitet und weiterentwickelt werden (Fischschutz hinter dem Rechen, Baldeney-Projekt, Modul I OVeR-Projekt). Dabei hat sich die Einteilung in vier Versuchsphasen als praktikabel erwiesen (Abb. 4-40).

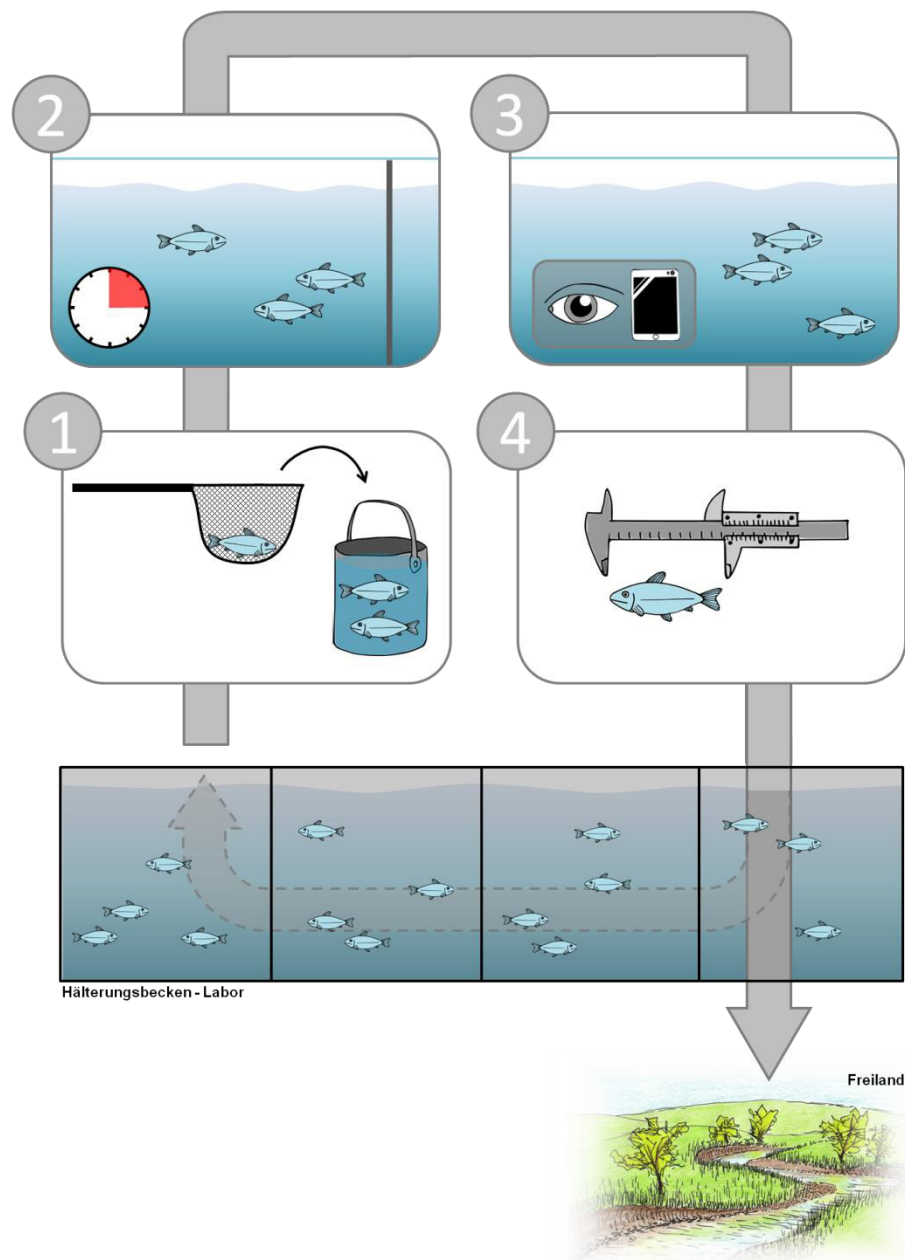


Abb. 4-40: Generelle Vorgehensweise bei ethohydraulischen Untersuchungen (Bild: BÖCKMANN & HÖPFNER)

Bevor die Fische für die jeweiligen ethohydraulischen Tests in den Versuchseinrichtungen zum Einsatz kommen, werden sie nach ihrem Fang in entsprechende Halterungsbecken vor Ort gesetzt und ca. ein bis vier Tage in diesen belassen. Nach ihrem Einsatz werden die Tiere in ihre Herkunfts- bzw. entsprechend geeignete Gewässer freigelassen. Die vier Phasen werden im Folgenden detailliert beschrieben und ihre jeweilige Anwendung in Modul II des OVeR-Projektes aufgeführt.

### Phase 1: Einsetzen der Fische

Zunächst werden die Probanden mithilfe eines Übergangsgefäßes aus den Halterungsbecken in die Versuchsrinne überführt. Dieser Vorgang muss möglichst kurz ge-

halten werden, um den damit verbundenen Stress für die Fische möglichst gering zu halten (vgl. Kap. 4.1.2.4, PETERS 1979).

Anwendung in OVeR, Modul II: Hier wurden für die Untersuchungen je drei Fische mit einem Kescher aus der Hälterungsanlage entnommen und in ein Übergangsgefäß eingebracht. Dabei wurden individuelle Merkmale registriert, um später eine individuelle Verhaltensbewertung vornehmen zu können (vgl. Kap. 4.1.2.2.2). Im Anschluss an diese Individualisierung, die bis zu fünf Minuten dauerte, erfolgte das Einbringen der Probanden in den Startbereich der Versuchsrinne.

### **Phase 2: Akklimatisierung**

Im Startbereich findet eine Akklimatisierung der Probanden statt. Da das Umsetzen der Fische aus den Hälterungsbecken in die Versuchsrinne mit Stress verbunden ist, werden die Fische zunächst 15 Minuten an die neuen Bedingungen gewöhnt.

Anwendung in OVeR, Modul II: Die Strömungsgeschwindigkeit im Startbereich lag während der Eingewöhnung bei 0,15 m/s. Nach 15 Minuten wurde der Durchfluss über einen Zeitraum von etwa fünf Minuten so weit erhöht, dass sich vor dem Rechen eine Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s einstellte.

### **Phase 3: Verhaltensbeobachtung**

Nach der Akklimatisierungs-Phase wird das Starttor geöffnet; die Fische können sich frei im Versuchsbereich bewegen und ihr Verhalten kann durch die Experimentatoren beobachtet werden.

Anwendung in OVeR, Modul II: Das Verhalten der Fische wurde über einen Zeitraum von 30 Minuten bzw. bis zum Überschwimmen der zuvor definierten Ziellinie oder einer Passage des Rechens beobachtet. Die Fische wurden dabei individuell voneinander unterschieden.

### **Phase 4: Fang der Fische und Zurücksetzen in die Hälterungsbecken**

Nach Ablauf der Untersuchungszeit wird der Zufluss in der Versuchsrinne abgeschaltet, um die Fische zu fangen und zurück in die Hälterungsanlage zu setzen.

Anwendung in OVeR, Modul II: Nach dem Fang aus der Versuchsanlage wurde die Körperlänge der Fische individuell bestimmt. Anschließend wurden die Fische zurück in die Hälterungsbecken gesetzt.

Nach Abschluss der ethohydraulischen Untersuchungen wurden alle Fische durch einen Tierarzt bzw. eine Tierärztin in Augenschein genommen und in einem den artspezifischen Ansprüchen angemessenen Gewässer bzw. im Ursprungsgewässer freigelassen.

Tab. 4-5 gibt einen Überblick über die vier Phasen der ethohydraulischen Versuchsdurchführung und ihre jeweilige Umsetzung im Modul II des OVeR-Projektes.

Tab. 4-5: Überblick über die vier Phasen der ethohydraulischen Versuchsdurchführung und ihre jeweilige Umsetzung im Modul II des OVeR-Projektes

Standard	Anwendung OVeR
<b>Phase 1: Einsetzen der Fische</b>	
<p>Auswahl der Fische für das jeweilige Untersuchungs-Setup</p> <p>Entnahme der Probanden aus Hälterungsbecken</p>	<p>Auswahl und Entnahme von 3 Individuen einer Art (Lachs, Rotaugen, Aal), individuelle Erkennung der Probanden</p>
<b>Phase 2: Akklimatisierung</b>	
<p>Einsetzen der ausgewählten Probanden in den Startbereich</p> <p>Eingewöhnung an die in der Versuchsrinne vorherrschenden Bedingungen bei moderaten Strömungen</p>	<p>Einsetzen der ausgewählten Probanden in den Startbereich</p> <p>Eingewöhnung der Probanden bei 0,15 m/s für eine Dauer von 15 Minuten</p>
<b>Phase 3: Verhaltensbeobachtung</b>	
<p>Öffnen des Starttores</p> <p>Standardisierte Aufnahme des Verhaltens</p> <p>Im Vorfeld definierte Datenaufnahme (Welche Daten werden auf welche Weise aufgenommen?)</p>	<p>Einstellen einer Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s vor dem Rechen und 0,3 bzw. 0,5 m/s im Bypasseingang, Öffnen des Starttores</p> <p>Individuelle Beobachtung des Verhaltens der Fische (Überschwimmen zuvor definierter Linien, Rechen-Interaktionen) mittels Protokoll-Anwendung</p> <p>Zeitraum der Datenaufnahme: 30 Minuten oder bis zum Überschwimmen aller Probanden der zuvor definierten Ziellinie bzw. Durchschwimmen des Rechens</p>
<b>Phase 4: Zurücksetzen der Fische</b>	
<p>Abschalten Zufluss Versuchsrinne</p> <p>Zurücksetzen der Probanden in die Hälterungsanlage</p>	<p>Abschalten Zufluss Versuchsrinne</p> <p>Vermessen der Körperlänge der einzelnen Probanden</p> <p>Zurücksetzen der Probanden in die Hälterungsanlage</p>

### 4.3.2 Anzahl an Versuchswiederholungen

#### 4.3.2.1 Anzuwendende Grundlagen

Die Anzahl insgesamt benötigter Tiere kann mathematisch hergeleitet werden; verschiedene Möglichkeiten dafür werden in Kapitel 5 näher erläutert. Wurde die Gesamtzahl an Fischen, die statistisch signifikante Aussagen ermöglichen, berechnet, stellt sich die Frage, ob die Tiere in Gruppen getestet werden können, um die Anzahl an Untersuchungen zu reduzieren. Hierbei sind die Grundlagen beim Testen von Gruppen (vgl. Kap. 4.1.2.2) zu berücksichtigen. Unter anderem dürfen die Fische sich gegenseitig nicht in einem Maße beeinflussen, dass individuelles Verhalten durch Gruppenverhalten überprägt wird. Um den Einfluss von individuellen Verhaltensflexibilitäten und (unerwünschten) Randfaktoren (vgl. Kap. 4.3.3) auf das Ergebnis zu minimieren, muss zudem jedes Setup mit einer ausreichenden Anzahl an Wiederholungen getestet werden (vgl. SCHÜTZ & HENNING 2017).

Im Projekt „Fischschutz hinter dem Rechen“ wurde nach der Vorgehensweise „*trial and error*“ vorgegangen: Hier wurde im Rahmen eines Versuches ein bestimmtes Setup getestet und auf Grundlage der Ergebnisbewertungen in einem nächsten Schritt das Setup angepasst. Beispielsweise wurden die Evakuierungssysteme im Rahmen des Projektes einmalig mit verschiedenen Fischarten getestet. Wurde ein bestimmtes Setup durch die Fische nicht angenommen, folgte eine Anpassung und ein erneuter Test des Setups. Dieser Vorgang wurde wiederholt, bis die getesteten Fischarten die Konfiguration annahmen. Mehrfache Untersuchungen eines bestimmten Setups wurden jedoch nicht durchgeführt.

Wird ein bestimmtes Setup nur einmalig getestet, besteht die Gefahr, dass spezielle Verhaltensweisen eines Tieres, aufgrund individueller oder genetischer Abweichungen, das Ergebnis bestimmen, auch wenn diese nicht repräsentativ für die übrigen Individuen der Fischart sind. Darüber hinaus kann eine Reihe von Parametern, die sich im Laufe einer Periode von Messwiederholungen verändern (z. B. biologische Faktoren in Abhängigkeit von der Tages- oder Jahreszeit) bei nur einer Untersuchung nicht abgebildet werden bzw. ihr Einfluss nicht berücksichtigt werden, was letztlich zu Fehlinterpretationen der Ergebnisse führen kann.

Messwiederholungen gehen zwangsläufig mit einem höheren Bedarf an Versuchstieren einher. Um die Anzahl an Fischen möglichst gering zu halten, können Individuen wiederholt für die Untersuchungen eingesetzt werden. Allerdings sind dabei unbedingt die in Kap. 4.1.2.3 beschriebenen Grundlagen zu berücksichtigen.

Erste Anpassungen der Vorgehensweise im Hinblick auf Messwiederholungen von Untersuchungen wurden im Rahmen des Moduls I des OVeR-Projektes durchgeführt. Hierbei wurden pro Versuchs-Setup fünf Wiederholungen mit jeweils sechs Fischen durchgeführt.

Im Rahmen von ethohydraulischen Untersuchungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde wurden nach dem Crossover-Versuchsdesign (s. Kap. 4.1.2.3) neun Wiederholungen mit jeweils drei Fischen von jedem Setup durchgeführt.



#### **4.3.2.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt**

Um den Effekt abweichender Verhaltensweisen bestimmter Individuen auf das Ergebnis zu minimieren, wurden im Rahmen des Moduls II pro Untersuchungs-Setup (ein bestimmter Rechenstababstand bei einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit im Bypasseingang) neun Wiederholungen mit drei Individuen je Fischart durchgeführt.

#### **4.3.3 Randomisierung**

##### **4.3.3.1 Anzuwendende Grundlagen**

Ein grundlegendes Problem ethohydraulischer Versuche liegt in der Zeitspanne, über welche die Untersuchungen sich erstrecken. So können sich im Laufe der Versuchsdurchführung verschiedene Randfaktoren (z. B. die Motivation der Probanden oder Zunahme der Wassertemperatur aufgrund von Wärmeeintrag der Pumpen) verändern und damit die Ergebnisse verfälschen. Derartige Veränderungen können über Wochen und Monate, aber auch schon im Laufe eines Tages stattfinden.

Auch eine bestimmte Gruppenzusammensetzung während eines Tests kann einen Effekt auf die Ergebnisse haben, da nicht ausgeschlossen werden kann, ob sich die einzelnen Probanden gegenseitig beeinflussen. Die Zusammensetzung der Individuen innerhalb einer Gruppe wird jedoch ohnehin durch zufällige Entnahme der Probanden aus den Hälterungsbecken bestimmt. Durch Versuchswiederholungen können mögliche Effekte der Gruppenzusammensetzung weiter minimiert werden (s. Kap. 4.3.2).

Um eine Verfälschung der Versuchsergebnisse durch zeitabhängige Randfaktoren (s. o.) so weit wie möglich auszuschließen, muss eine zufällige Zuteilung (Randomisierung) der verschiedenen untersuchten Versuchs-Setups für die Versuchswiederholungen vorgenommen werden (vgl. KÖHLER et al. 2007). Im Gegensatz zu einer systematischen Untersuchung der verschiedenen Versuchs-Setups (schrittweise geordnete Abarbeitung der Setups), bei der ein bestimmter Randfaktor womöglich nur während eines einzigen Setups wirkt, wird sein Effekt durch die Randomisierung in verschiedenen, zufällig bestimmten Setups auftreten. Die Randomisierung ermöglicht damit eine Minimierung unbekannter nicht beeinflussbarer Faktoren, wie beispielsweise tageszeitliche oder jahreszeitliche Effekte.

Im Rahmen der beiden Forschungsprojekte „Fischschutz hinter dem Rechen“ und dem Baldeney-Projekt wurde zwar noch keine Randomisierung angewendet, jedoch wurden die verschiedenen Versuchs-Setups bewusst nicht in systematischer Abfolge getestet. Im Baldeney-Projekt wurden beispielsweise jeweils innerhalb eines Tages verschiedene Wasserstände und Leitströmungen im Lift-Einstieg getestet.

Auch im Rahmen des Moduls I des OVeR-Projektes wurde noch keine zufällige Zuteilung der einzelnen Setups realisiert. So wurden beispielsweise die Untersuchungen zu den verschiedenen Stababständen systematisch abgearbeitet (10, 20, 40 mm). Ein möglicher Einfluss, der beispielsweise zu Beginn einer Messreihe (Stababstand 10 mm) gegeben war (z. B. Luftdruck), spielte womöglich bei dem zuletzt getesteten Setup (Stababstand 40 mm) keine Rolle mehr.

#### **4.3.3.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt**

In Modul II des OVeR-Projektes erfolgte eine zufällige Zuweisung der verschiedenen Untersuchungs-Setups. So wurde für jeden Versuchsdurchgang per Münzwurf bestimmt, welche der beiden zu untersuchenden Strömungsgeschwindigkeiten im Bypasseingang eingestellt werden sollte. Weitere Möglichkeiten der Randomisierung bestehen in Zufallszahlen, die aus Zufalls-Tafeln oder durch Würfeln erreicht werden (KÖHLER et al. 2007).

Während eine zufällige Einstellung der Variable „Strömungsgeschwindigkeit im Bypasseingang“ in der Praxis leicht realisiert werden konnte, war die Randomisierung der Variable „Rechenstababstand“ deutlich schwieriger umzusetzen, da der Umbau zwischen verschiedenen Stababständen mit einem größeren Aufwand verbunden war. Ein häufiger Wechsel der Einstellungen, wie etwa bei der Strömungsgeschwindigkeit (s. o.) war also nicht möglich. Um dennoch zu verhindern, dass über eine systematische Untersuchung der verschiedenen Stababstände (20, 40, 60 mm) Artefakte generiert wurden, wurde der Rechen innerhalb einer Versuchswoche auf zwei verschiedene Stababstände umgebaut. So konnte ein potentieller Einfluss eines Randfaktors, der womöglich nur in einer bestimmten Woche herrschte, auf zwei Setups und nicht nur auf eines verteilt werden. Bei den Lachssmolts sollte so u. a. eine mögliche Zunahme der Motivation egalisiert werden. Wäre hierbei eine systematische Vorgehensweise gewählt worden (schrittweises Testen der drei Stababstände), hätten Unterschiede im Motivationsgrad der Lachssmolts evtl. zu falschen Rückschlüssen führen können.

Die Randomisierung der Versuchs-Setups erfolgte aufgrund unterschiedlicher Motivationszeiträume der getesteten Fischarten und damit unterschiedlicher Untersuchungszeiträume im Jahr nur artspezifisch.

#### **4.3.4 Datenaufnahme**

##### **4.3.4.1 Anzuwendende Grundlagen**

Die Festlegung der Datenaufnahme für die Hauptversuche findet in den Vorversuchen statt (vgl. 4.2). Es ist überaus wichtig, eine entsprechende Vorgehensweise schon vor den Hauptversuchen zu erarbeiten und diese im Rahmen der Vorversuche zu erproben und ggf. anzupassen. Dies ermöglicht die objektive Reproduzierbarkeit der Datenerhebung (vgl. EBEL 2017). Eine Anpassung der Datenaufnahme im Verlauf der Hauptversuche ist nicht zulässig. So dürfte beispielsweise die Größenbestimmung der Probanden nicht zunächst anhand des Gewichts und später anhand der Körperlänge vorgenommen werden. Eine solche Anpassung würde dazu führen, dass für die spätere statistische Auswertung der Daten keine Vergleichbarkeit mehr besteht.

Im Rahmen des Projektes „Fischschutz hinter dem Rechen“, des Baldeney-Projektes sowie der im Modul I des OVeR-Projektes durchgeführten Vorversuche erfolgte die Datenaufnahme zunächst noch handschriftlich. Abb. 4-41 gibt darüber beispielhaft einen Einblick.

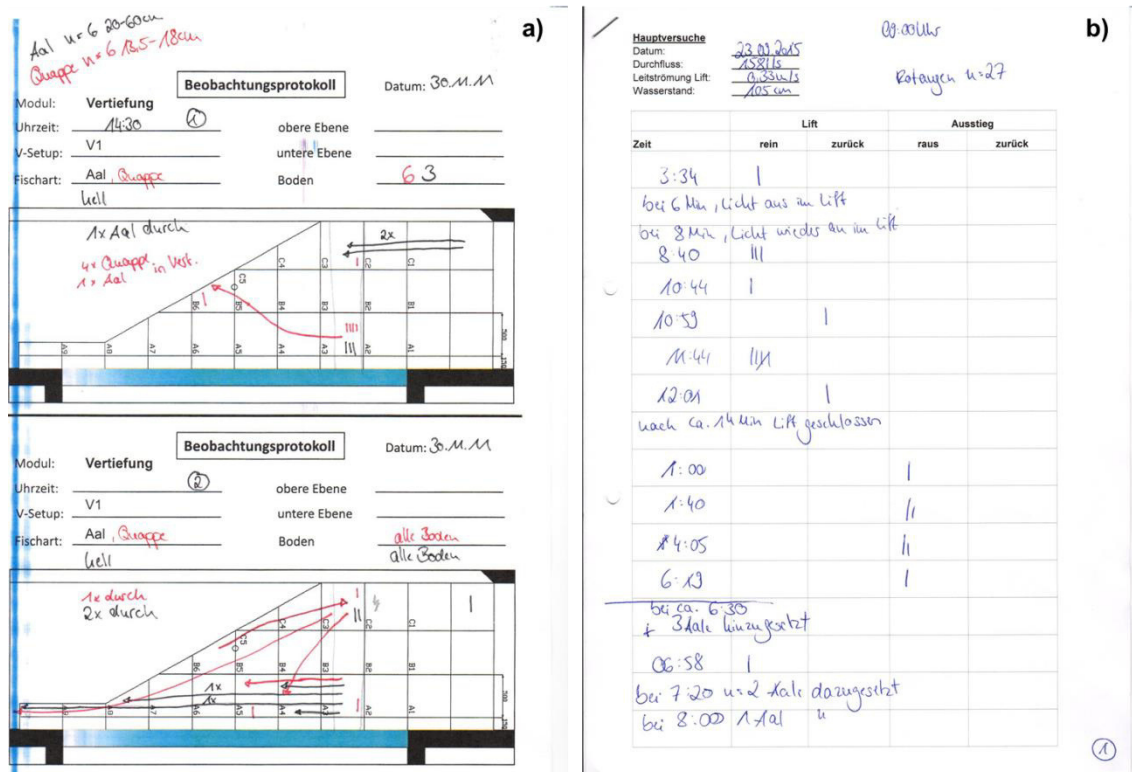


Abb. 4-41: Beispiele der handschriftlichen Datenaufnahme während ethohydraulischer Tests, a) Projekt „Fischschutz hinter dem Rechen“, b) Baldeney-Projekt, hier: Abstiegsuntersuchungen

Zwar wurden im Vorfeld der Hauptversuche standardisierte Protokollbögen entwickelt, deren Praktikabilität in Vorversuchen getestet wurde, die spätere Digitalisierung der Daten im Anschluss an die Untersuchungen erwies sich jedoch als sehr zeitaufwendig. Zudem liegt in der manuellen Übertragung von Daten immer auch eine potentielle Fehlerquelle. Unter dem Aspekt des Ressourcenschutzes ist bei der beschriebenen Methode außerdem der hohe Papierverbrauch zu bemängeln.

Insbesondere im Baldeney-Projekt zeigte sich, dass die Anordnung der Daten in den bei der Auswertung verwendeten Excel-Tabellen bereits im Vorfeld der Datenaufnahme feststehen musste, um ein langwieriges Datenmanagement zu vermeiden (s. Kap. 4.3.6).

Aus den Erfahrungen der vorherigen Projekte wurde daher zur Optimierung der Datenaufnahme für die Hauptversuche des Moduls I des OVer-Projektes eine Software-Anwendung (App) entwickelt, die es ermöglichte, Daten bereits während der ethohydraulischen Tests in digitaler Form aufzunehmen. Die Softwareentwicklung erfolgte in Zusammenarbeit mit der IT Abteilung des IWW der RWTH Aachen University. Mit der Protokoll-App konnten die Daten direkt über Tablets (Modell Samsung Nexus 7, 2013) aufgenommen und später in eine entsprechende Excel-Tabelle exportiert werden.

#### 4.3.4.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVer-Projekt

Für das Modul II des OVer-Projektes wurde die für das Modul I entwickelte Anwendung entsprechend der aufzunehmenden Daten angepasst.

Mithilfe der Anwendung wurden vor Beginn eines ethohydraulischen Tests alle relevanten Versuchsbedingungen des Versuchs-Setups aufgenommen.

Abb. 4-42 zeigt die entsprechende Benutzeroberfläche und gibt einen Überblick über die Auswahlmöglichkeiten der Versuchsbedingungen, die über die Protokoll-Anwendung für das jeweilige Versuchs-Setup eingetragen werden konnten.

Die Aufnahme der Daten erfolgte in der Regel durch zwei Beobachter mit je einem Tablet.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die Zeit bis zum Passieren zuvor festgelegter Linien, die auf der Sohle der Versuchsrinne (Abb. 4-43) markiert waren, aufgenommen. Diese Markierungen blieben über alle Hauptversuche hinweg unverändert. Die Abb. 4-43 zeigt einen schematischen Überblick über die drei für die spätere Auswertung der Daten relevanten Linien.

Das Verhalten der Fische wurde während der ethohydraulischen Tests über einen Zeitraum von je 30 Minuten beobachtet. Die Beobachtung erfolgte aus dem Beobachtungsraum heraus und wurde durch Videoaufnahmen (vgl. Kap. 4.3.5) ergänzt.

Mit dem Öffnen des Starttors wurde die Datenaufnahme über die Protokoll-Anwendung gestartet. Dazu wurde von beiden Beobachtern durch gleichzeitiges Betätigen der Stoppuhr der Start des ethohydraulischen Tests initiiert. Differenzen konnten nachträglich über den Zeitoffset ausgeglichen werden (Abb. 4-42, Nr. 4). Abb. 4-44 gibt einen beispielhaften Überblick über die Benutzeroberfläche der beiden Tablets zu Beginn bzw. nach Ende eines ethohydraulischen Versuchs.

**← Experimentbeschreibung a)**

Datum 16.05.2017 1 Uhrzeit 15:08:52 2 laufende Nummer 4

Sekundäre Beobachtung ☒ 3 Zeitoffset [s] 4

**FISCHE** 5

1 -- kein Fisch -- Länge [...] 7

Eigenschaften 6

2 -- kein Fisch -- Länge [...]

Eigenschaften

3 -- kein Fisch -- Länge [...]

Eigenschaften

**RECHEN** 8

v [m/s] < [°] ↔ [mm]

**BYPASS** 9

seitlich v [m/s]

**WASSER** 10 **WETTER** 11

Q [l/s] h [mm] T [°C] bewölkt

**← Experimentbeschreibung b)**

Datum 16.05.2017 Uhrzeit 15:08:52 laufende Nummer 14

Sekundäre Beobachtung ☒ Zeitoffset [s]

**FISCHE**

1 Lachs Länge [mm] 139

Eigenschaften kaputte Rückenflosse

2 Lachs Länge [mm] 138

Eigenschaften weiße Nase

3 Lachs Länge [mm] 140

Eigenschaften ohne Merkmal

**RECHEN**

v [m/s] < [°] ↔ [mm]

0.5 70 20

**BYPASS**

seitlich v [m/s] 0.5

**WASSER** h [mm] T [°C] **WETTER**

Q [l/s] 850 17.4 sonnig

Nr.	Parameter	Beschreibung
1	Datum und Uhrzeit	Automatische Erstellung bei Anlegen einer neuen Untersuchung
2	Laufende Nummer	Automatische Erstellung bei Anlegen einer neuen Untersuchung
3	Sekundäre Beobachtung	Aktiviert bei Protokollierung mit zwei Beobachtern
4	Zeitoffset	Bei zeitlicher Differenz zwischen Tablet 1 und Tablet 2 (bei zwei Beobachtern), Eingabe zur Anpassung der Zeit
5	Fische	Eingabe von drei Fischen (Individuen), es kann zwischen verschiedenen Fischarten gewählt werden
6	Eigenschaften	Eingabe besonderer Merkmale der drei untersuchten Individuen
7	Länge	Eingabe der Körperlänge der untersuchten Individuen
8	Rechen	Eingabe der Anströmgeschwindigkeit am Rechen (hier: 0,5 m/s), des Neigungswinkels (hier: 70 °) und des Stababstandes (hier: 10, 20, 40 oder 60 mm)
9	Bypass	Eingabe der Art des Bypasses (hier: seitlich), und der Strömungsgeschwindigkeit im Bypasseingang (hier: 0,3 oder 0,5 m/s)
10	Wasser	Eingabe von Durchfluss, Wasserstand und Wassertemperatur
11	Wetter	Auswahlmöglichkeiten: sonnig, bewölkt, wechselnd bewölkt, Regen

Abb. 4-42: Benutzeroberfläche der OVeR-App (Modul II): Digitaler Protokollbogen mit a) leeren Eingabefeldern vor Beginn einer Untersuchung (für Erläuterungen 1-11 s. darunter stehende Tabelle) und b) eingegebenen Daten

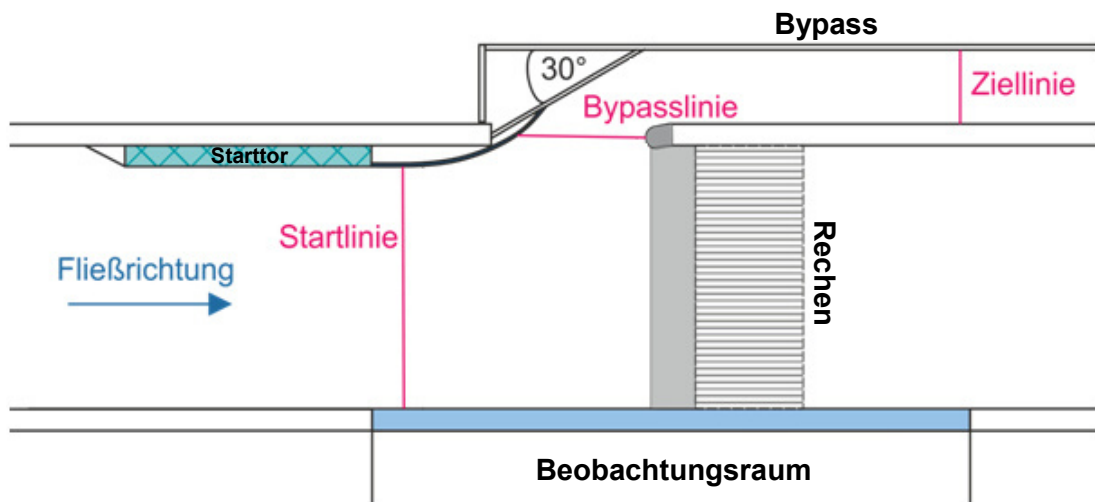


Abb. 4-43: Schematische Darstellung (Aufsicht) der ethohydraulischen Versuchsrinne im Wasserbaulabor der RWTH Aachen mit Darstellung der einzelnen Linien zur Protokollierung des Schwimmverhaltens der Probanden im Rahmen des OVeR-Projektes (Modul II) (Quelle: BÖCKMANN et al. 2018b, verändert)

**a) (gestoppt) 00:00**

Transit Fische

1. – kein Fisch – 0mm

Startbereich	Versuchsbereich	Bypass	Zielbereich

2. – kein Fisch – 0mm

Startbereich	Versuchsbereich	Bypass	Zielbereich

3. – kein Fisch – 0mm

Startbereich	Versuchsbereich	Bypass	Zielbereich

1. Fisch      2. Fisch      3. Fisch

Ereignisliste

Rechenansicht frontal

•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•

**b) (beendet) 28:33**

Transit Fische

1. Lachs 139mm, kaputte Rückenflosse

Startbereich	Versuchsbereich	Bypass	Zielbereich

2. Lachs 138mm, weiße Nase

Startbereich	Versuchsbereich	Bypass	Zielbereich

3. Lachs 140mm, ohne Merkmal

Startbereich	Versuchsbereich	Bypass	Zielbereich

1. Fisch      2. Fisch      3. Fisch

Z 28:29	E 02:47	E 17:39
B 28:00		S 16:43
E 20:21		E 16:32
S 16:38		S 16:29
E 16:33		E 08:26
S 16:27		S 06:13

Ereignisliste

Rechenansicht frontal

Ko 1u	1. Lachs 139mm, kaputte Rückenflosse 27:15	•	•	•	•	•
Ko 1u	1. Lachs 139mm, kaputte Rückenflosse 27:12	•	•	•	•	•
Ko 1m	1. Lachs 139mm, kaputte Rückenflosse 23:52	•	•	•	•	•
>> 1u	3. Lachs 140mm, ohne Merkmal 19:10	•	•	•	•	•
•	3. Lachs 140mm, ohne	•	•	•	•	•

Abb. 4-44: Benutzeroberfläche der OVeR-App (Modul II): Digitaler Protokollbogen zur Protokollierung von Schwimmwegen und Interaktionen mit dem Rechen a) zu Beginn und b) nach Ende einer Untersuchung

Innerhalb des 30-minütigen Untersuchungszeitraums wurde das Überschwimmen der zuvor definierten Linien (Start-, Bypass- und Ziellinie) individuen-spezifisch aufgenommen. Auch ein Zurückschwimmen wurde dokumentiert. Die Protokollierung erfolgte

durch Auswahl des entsprechenden Buttons im Moment des Überschwimmens, wobei die Protokoll-Anwendung automatisch den Zeitpunkt des jeweiligen Ereignisses mit aufnahm. Darüber hinaus wurden Interaktionen mit dem Rechen (Kontakt, Kontakt und Lösen, dauerhafter Kontakt und Durch- bzw. Zurückschwimmen) aufgenommen. Die Positionen der einzelnen Interaktionen konnten dabei über die Protokoll-Anwendung individuenspezifisch eingegeben werden (Abb. 4-44, „Rechenansicht frontal“).

Ein ethohydraulischer Test wurde spätestens nach Ablauf von 30 Minuten beendet oder aber, sobald alle drei Fische über die Ziellinie des Bypasses bzw. durch den Rechen geschwommen waren.

Die digitale Protokollaufnahme-App ermöglichte eine schnelle, weitgehend fehlerfreie Datenaufnahme unter standardisierten Bedingungen. Somit war es möglich, die Datenaufnahme im Verlauf der Untersuchungen durch wechselnde Beobachter durchzuführen.

Die aufgenommenen Daten wurden mithilfe einer speziellen Anwendung, die von der IT-Abteilung des IWW der RWTH Aachen programmiert wurde, exportiert und konnten so in eine vorgegebene Excel-Tabelle übertragen werden.

Die Excel-Tabelle bestand aus drei Tabellenblättern. Das erste Tabellenblatt beinhaltete die jeweiligen Versuchsbedingungen (Datum, Uhrzeit, Setup, Versuchstiere etc.), das zweite Blatt umfasste die jeweiligen Schwimmwege der Fische und die Zeiten der oben beschriebenen Linienüberquerungen. Das dritte Tabellenblatt enthielt die Interaktionen der Fische mit dem Rechen.

#### **4.3.5 Datenaufnahme über Kamerasysteme**

##### **4.3.5.1 Anzuwendende Grundlagen**

Videokameras bieten im Rahmen ethohydraulischer Tests eine zusätzliche Möglichkeit, das Verhalten von Fischen zu beobachten, dabei erweisen sie sich insbesondere bei solchen Situationen als hilfreich, in denen die Fische nicht direkt vom Experimentator beobachtet werden können. So stellte sich beispielsweise im Baldeney-Projekt eine im Lift-Modell installierte Unterwasserkamera als sehr hilfreich heraus, um das Auschwimmen der Probanden zu erfassen. Darüber hinaus bietet die Aufnahme von Videos die Möglichkeit, bei späteren Unsicherheiten in der Auswertung Sequenzen wiederholt anzuschauen und zu bewerten. Weiter sind Videoaufnahmen als Anschauungsmaterial bei der Präsentation von Ergebnissen von Bedeutung, da sie diese visuell belegen können.

##### **4.3.5.2 Anwendung der Grundlagen auf das OVeR-Projekt**

Um den gesamten Versuchsbereich einsehbar zu machen und das Fischverhalten auf Video aufzuzeichnen, wurden im Modul II vier (Unterwasser-)Kameras in der Versuchsrinne installiert. Die Fischaugenkamera „K1“ (Gigabit Ethernet Kamera mit Fujinon F1,4/1,8 mm Fischaugenobjektiv) gab einen Überblick über den Bereich von Rechen und Bypasseingang. Ein Einschwimmen über die für die Datenaufnahme relevante

„Ziellinie“ wurde über die (Unterwasser-)Kamera „K2“ (UWK-TVI, 2MP IR) aufgenommen. Die (Unterwasser-)Kamera „K3“ (UWK-TVI, 2MP IR) ermöglichte den Einblick in den Startbereich. Interaktionen mit dem Rechen wurden von Kamera „K4“ (UWK-TVI, 2MP IR), die sich im Beobachtungsraum befand, aufgezeichnet. Abb. 4-45 gibt einen Überblick über die Positionen der einzelnen Kameras im Modul II, Abb. 4-46 zeigt beispielhaft Bildausschnitte der einzelnen Kameras.

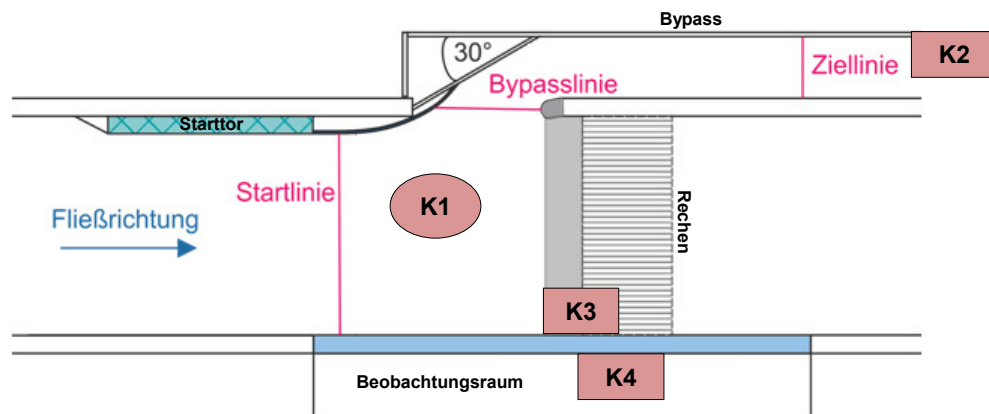


Abb. 4-45: Positionen der verschiedenen Kameras (K1-4) in der Versuchsrinne während Modul II des OVeR-Projektes

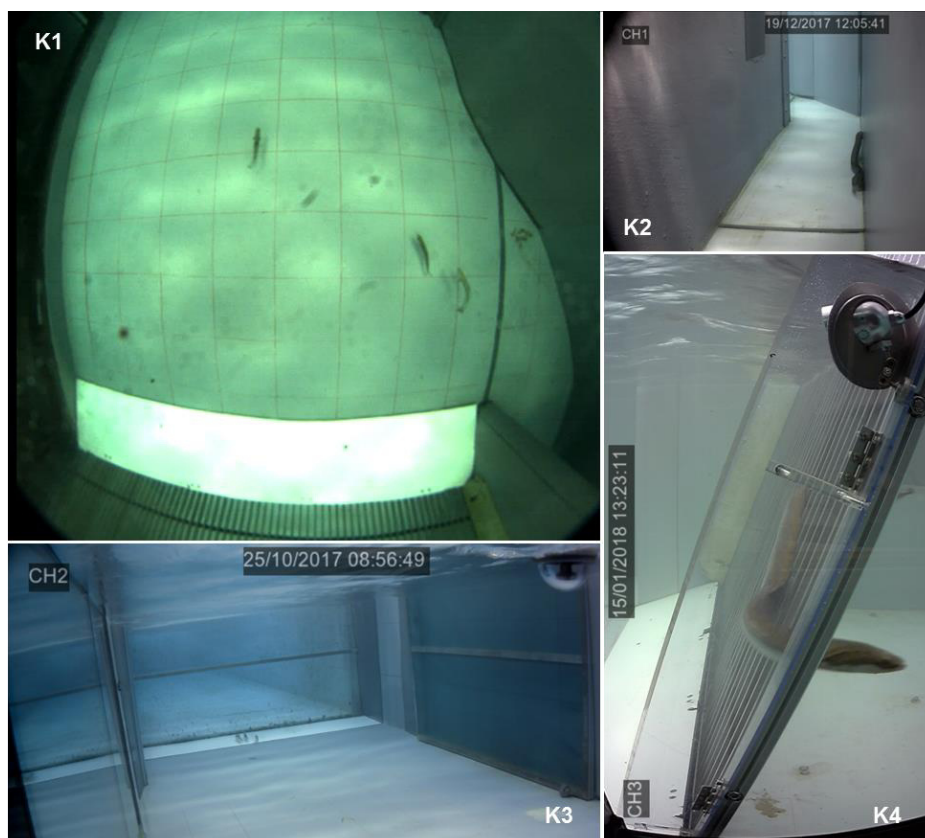


Abb. 4-46: Momentaufnahmen der einzelnen Kameras (K1-4) im Modul II im Wasserbaulabor der RWTH Aachen (OVeR-Projekt)



#### 4.3.6 Auswertung ethohydraulisch zählbarer Ereignisse

Wie eingangs erläutert, gibt es zwei Ebenen der statistischen Datenauswertung: die deskriptive und die schließende Statistik (Kap. 2.1.4). Im Folgenden wird die bisherige Vorgehensweise bei ethohydraulischen Untersuchungen anhand der beiden Beispiel-Projekte „Fischschutz hinter dem Rechen“ und dem Baldeney-Projekt dargestellt. Hierbei wurde auf der Ebene der deskriptiven Statistik gearbeitet. In erster Linie stand dabei die qualitative Beschreibung von reizinduzierten Verhaltensweisen im Vordergrund. Im Gegensatz dazu wurde im Rahmen des OVeR-Projektes damit begonnen, ethohydraulisch zählbare Ereignisse mittels schließender Statistik auszuwerten.

##### 4.3.6.1 Bisherige Vorgehensweise

Im Projekt „Fischschutz hinter dem Rechen“ wurden die erhobenen Daten schwerpunktmäßig qualitativ ausgewertet. Eine Auswertung der zählbaren Ereignisse auf der Ebene der schließenden Statistik wurde nicht durchgeführt. Dies lag u. a. an verschiedenen Randbedingungen, welche die Vorgehensweise während der Untersuchungen betraf und eine Auswertung mittels schließender Statistik nicht erlaubte. So wurden die ethohydraulischen Untersuchungen nach dem Prinzip *trial and error* durchgeführt und darüber hinaus nur vereinzelt Versuchswiederholungen vorgenommen (s. Kap. 4.3.2). Die jeweiligen Versuchs-Setups wurden relativ schnell verändert, teilweise unter gleichzeitiger Änderung mehrerer Parameter (z. B. Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit). So konnten mögliche Verhaltensänderungen der Probanden nicht eindeutig auf einen bestimmten Parameter zurückgeführt werden. Darüber hinaus wurde auch die Zusammensetzung der Versuchsgruppen (Anzahl der Individuen, Zusammensetzung der Fischarten) in den Untersuchungen unterschiedlich gewählt, was eine spätere statistische Auswertung der Daten nur in Maßen zuließ.

Im Folgenden sollen beispielhaft einige Aspekte vorgestellt werden, die zu Schwierigkeiten bei der Auswertung der aufgenommenen Daten führen können, welche sowohl die deskriptive als auch die schließende Auswertung betreffen.

##### Auswertung prozentualer Anteile

Im Rahmen des Baldeney-Projektes war es nicht möglich, einen prozentualen Anteil an in das Lift-Modell eingeschwommenen Fischen zu berechnen. Grund hierfür war, dass einige (evtl. unmotivierte) Versuchstiere über den gesamten Versuchsverlauf im Startbereich verblieben und somit gar nicht am eigentlichen Test teilnahmen. Für die Ermittlung des Anteils der in den Lift eingeschwommenen Fische hätte die Anzahl dieser unmotivierten Probanden dokumentiert und von der Gesamtzahl der eingesetzten Probanden abgezogen werden müssen. Da dieser Wert jedoch nicht aufgenommen wurde, gab es nur einen Wert für die Gesamtzahl an nicht eingeschwommenen Fischen, unabhängig davon, ob sie am Test teilgenommen und die Lift-Struktur aktiv gemieden (bspw. aufgrund ungünstiger Strömungsbedingungen) oder überhaupt nicht am Test teilgenommen haben. Dementsprechend wurde im Rahmen des Baldeney-Projektes zunächst qualitativ dargestellt, ob die untersuchten Fischarten in das Lift-Modell eingeschwommen waren oder nicht.

Im Rahmen von Modul I des OVeR-Projektes wurde damit begonnen, die Daten nach einem Standard aufzunehmen, der eine statistische Auswertung zuließ. Im Gegensatz zu den vorigen ethohydraulischen Untersuchungen konnten so quantitative Aussagen zum Fischverhalten bei verschiedenen Versuchs-Setups erfolgen (z. B. signifikante Unterschiede in der Häufigkeit der Rechenkontakte in Abhängigkeit von der Rechen-Anströmgeschwindigkeit). Allerdings zeigten sich auch hierbei noch einige Mängel. Eine Aussage über den Anteil an Fischen, die durch einen Rechen mit einem bestimmten Stababstand geschwommen waren, war auch hier nicht möglich: Da keine individuelle Beobachtung der Versuchstiere vorgenommen wurde und für die Fische bei bestimmten Stababständen die Möglichkeit bestand, nach einer Rechenpassage wieder zurück in das Oberwasser und erneut durch den Rechen zu schwimmen, konnten Mehrfachzählungen nicht ausgeschlossen werden. Ein aktiver Proband, der nicht individuell zugeordnet werden konnte, hätte damit die Anzahl an Rechenpassagen fälschlicherweise erhöhen können. Des Weiteren fehlte die Zählung ggf. nicht motivierter Probanden, die im Startbereich verblieben.

#### Einheitliche Beobachtungszeiten

Die Untersuchungen zum Modul I des OVeR-Projektes zeigten weiter, dass einheitliche Beobachtungszeiten notwendig sind. Vereinzelt verkürzte Beobachtungszeiten infolge von vorzeitigem Versuchsende (z. B. bei Impingement<sup>19</sup> oder Rechenpassage aller Probanden) machten eine umständliche Normierung der Beobachtungszeit erforderlich, um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten.

#### **4.3.6.2 Erarbeitung neuer Grundlagen im Rahmen des OVeR-Projektes**

In den bisher durchgeführten ethohydraulischen Untersuchungen wurde in erster Linie auf qualitativer Ebene gearbeitet. In den letzten Jahren wurde jedoch auch begonnen, statistische Auswertungen von zählbaren Daten zu berücksichtigen (vgl. SCHÜTZ & HENNING 2017).

#### Berücksichtigung der Motivation der Probanden

Um durch Passivität von Probanden hervorgerufene Artefakte weitestgehend ausschließen zu können, wurden im Modul II des OVeR-Projektes für die Datenauswertung lediglich solche Fische berücksichtigt, die über eine zuvor festgelegte „Startlinie“ (Abb. 4-43) in den Versuchsbereich geschwommen waren. Diese Probanden wurden im Folgenden als „motiviert“ definiert. Tab. 4-6 zeigt die Anzahl der im ethohydraulischen Test in den Startbereich eingesetzten Probanden und die Anzahl der über die Startlinie geschwommen Probanden, die damit für die weitere Auswertung verwendet wurden.

---

<sup>19</sup> Angepresstwerden eines Fisches an eine mechanische Barriere, z. B. an einen Fischschutzrechen

Tab. 4-6: Anzahl der in den Startbereich eingesetzten und der in den Versuchsbereich eingeschwommen Probanden im Modul II des OVeR-Projektes (\* 54 Individuen, die mehrfach getestet wurden)

<b>Fischart</b>	<b>Anzahl an in den Startbereich eingesetzten Probanden</b>	<b>Anzahl an in den Versuchsbereich eingeschwommenen Probanden</b>
<b>Lachssmolts</b>	162	153
<b>Rotaugen</b>	162	81
<b>Aale*</b>	162	125

Die Abstiegs motivation der untersuchten Lachssmolts konnte über das Aussehen und unter Berücksichtigung der Jahreszeit (vgl. Kap. 4.1.2) sehr gut erfasst werden, somit gab es nur wenige Probanden, die aufgrund von Passivität bzw. fehlender Motivation nicht am Versuch teilnahmen (vgl. Tab. 4-6). Bei den Rotaugen zeigte sich, dass 50 % der eingesetzten Probanden im Startbereich verblieben, was vermutlich durch eine geringe Motivation begründet war. Wie oben bereits beschrieben, ist es bei dieser Fischart nicht einfach, einen genauen Abwanderzeitraum einzugrenzen. Für die Blank-aale ist zu berücksichtigen, dass die Probanden mehrfach getestet werden mussten. Eine Mehrfachverwendung war in diesem Fall jedoch zulässig, da statistisch keine signifikanten Unterschiede zwischen den wiederholten Versuchsdurchgängen nachgewiesen werden konnten (s. Kap. 4.1.2.3.2).

#### Datenauswertung mittels schließender Statistik

Im Folgenden wird das Prozedere der statistischen Datenauswertung im Modul II beispielhaft an der Forschungsfrage III (FIII) des OVeR-Projektes dargestellt. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse findet sich in BÖCKMANN et al. (2018b) und BÖCKMANN et al. (2018a).

FIII: Gibt es einen Unterschied in Bezug auf die kleinräumige Auffindbarkeit des Bypasses, die Akzeptanz der Bypassöffnung und die Passage der Bypassrinne für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten (0,3 m/s und 0,5 m/s) im Bypasseingang?

Für die Beantwortung der Fragestellung wurde ermittelt, ob es zwischen den beiden Strömungsgeschwindigkeiten einen Unterschied im Hinblick auf die Zeiten bis zum Überschwimmen der Ziellinie gibt. Die Grundlage für die Auswertung bildete die Zeit zwischen dem Einschwimmen der Probanden in den Versuchsbereich und dem Überschwimmen der Ziellinie. Der passende statistische Test wurde entsprechend Tab. 2-5 ausgewählt. Tab. 4-7 zeigt beispielhaft für die Beantwortung der Fragestellung III das Auswahlverfahren des statistischen Tests. Mit der Auswertung von Zeiten liegen individuelle Messwerte vor. Weiter lässt sich die Stichprobe nach einem Faktor, hier der Strömungsgeschwindigkeit, unterteilen. Diese lässt sich wiederum in zwei Gruppen, die zwei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten 0,3 und 0,5 m/s, unterteilen. Da die

Individuen jeweils nur einmal und nicht bei beiden Strömungsgeschwindigkeiten getestet wurden, war für die Untersuchung statistisch signifikanter Unterschiede entweder der parametrische t-Test oder der nicht-parametrische Mann-Whitney-U-Test möglich. Um zu überprüfen, welcher der beiden Tests zulässig ist, waren die Daten zunächst auf Normalverteilung und Varianzhomogenität zu überprüfen. Da beide Voraussetzungen für einen parametrischen Test nicht gegeben waren, wurde für die Auswertung ein **Mann-Whitney-U-Test** durchgeführt.

Der statistische Test wurde mit der Statistik-Software SigmaPlot (Version 12.0) durchgeführt.

Die Grundlage für den Hypothesentest bildete die folgende Nullhypothese  $H_0$ :

Nullhypothese  $H_0$ : Es gibt keinen signifikanten Unterschied in der Zeit vom Einschwimmen in den Versuchsbereich bis zum Erreichen der Ziellinie in Abhängigkeit von der getesteten Strömungsgeschwindigkeit im Bypasseingang.

Im Gegensatz dazu steht die Arbeitshypothese  $H_1$ :

Arbeitshypothese  $H_1$  - Es gibt einen signifikanten Unterschied in der Zeit vom Einschwimmen in den Versuchsbereich bis zum Erreichen der Ziellinie in Abhängigkeit von der getesteten Strömungsgeschwindigkeit im Bypasseingang.

Der Mann-Whitney-U-Test konnte für Lachssmolts und Blankaale signifikante Unterschiede nachweisen (Abb. 4-47), demnach wurde die Nullhypothese abgelehnt und die Arbeitshypothese angenommen. Für Rotaugen konnte kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden; demnach musste hier die Nullhypothese beibehalten bleiben.

Tab. 4-7: Schlüssel zur Auswahl eines statistischen Tests zur Analyse individueller Messwerte. Beispielhaft grün hervorgehoben sind erfüllte Bedingungen zur Analyse des der Forschungsfrage III des OVeR-Projektes (Modul II) zugrundeliegenden Datensatzes (nach BÜHNER & ZIEGLER 2009, verändert und ergänzt)

Die Hypothese testet auf einen Unterschied zwischen verschiedenen Stichproben									
Es liegen <b>individuelle Messwerte</b> vor (z. B. Zeiten)									
<b>Unterteilung der Stichproben nach einem Faktor</b> (z. B. Strömungsgeschwindigkeit)									
... <b>in zwei Gruppen</b> (z. B. 0,3   0,5 m/s)			... in mehr als zwei Gruppen (z. B. 0,3   0,5   0,8   1,0 m/s)			... nach mehreren Faktoren (z. B. Fischart, Strömungsgeschwindigkeit, Rechenstababstand)			
<b>unabhängige Stichproben</b> (Individuen werden nur einmal getestet)			abhängige Stichproben (Individuen werden in beiden Gruppen getestet)			unabhängige Stichproben			
Normal- verteilung	keine Normal- verteilung	keine Varianz- homogenität	Normal- verteilung	keine Normal- verteilung	keine Varianz- homogenität	Normal- verteilung	keine Normal- verteilung	Normalverteilung	
Varianz- homogenität	keine Varianz- homogenität	keine Varianz- homogenität	Varianz- homogenität	keine Varianz- homogenität	keine Varianz- homogenität	Varianz- homogenität	keine Varianz- homogenität	Varianzhomogenität	
t-Test	<b>Mann-Whitney- U-Test</b>	gepaarter t-Test	Wilcoxon-Test für Paardifferenzen	Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA*)	Kruskal-Wallis- Test	Repeated Measure ANOVA	Friedmann-Test	Zwei- bzw. Multifaktorielle Varianzanalyse (MANOVA*)	
								Repeated Measure MANOVA	

Abb. 4-47 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen zum einen in deskriptiver, darstellender Weise. Hierbei sind die Zeiten bis zum Überschwimmen der Ziellinie in Form von Box-Plots dargestellt. Zum anderen finden sich die Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests mit signifikanten Unterschieden zwischen den beiden getesteten Strömungsgeschwindigkeiten in Form von „Sternchen“ bzw. der Angabe „n. s.“ als nicht signifikant. Beide Auswertungsweisen werden damit in einer Abbildung dargestellt.

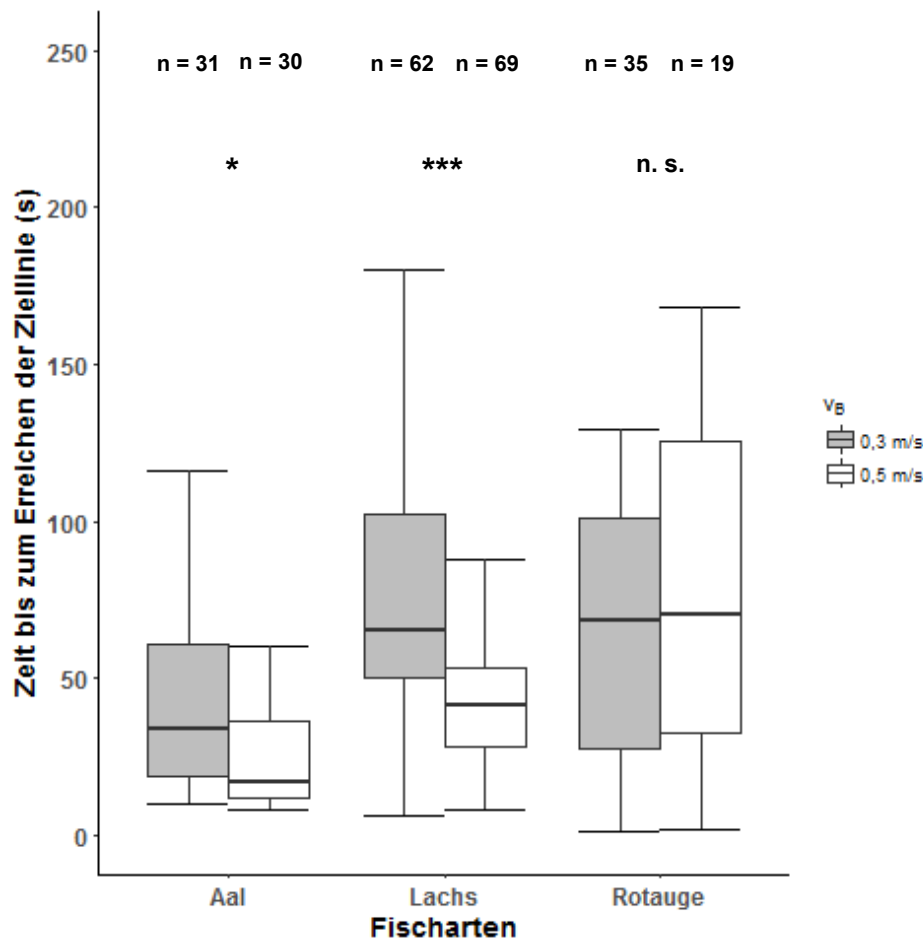


Abb. 4-47: Zeit bis zum Erreichen der Ziellinie für Aale, Lachse und Rotaugen im OVeR-Projekt (Modul II), dargestellt als Box-Whisker-Plots (ohne Angabe der Extremwerte), n = Anzahl an Probanden, stat. Test: Mann-Whitney-U-Test auf Unterschiede zwischen den Strömungsgeschwindigkeiten ( $v_B$ ), n. s. = nicht signifikant bei  $p \geq 0,05$ , \* signifikante Unterschiede  $p < 0,05$ , \*\*\* signifikante Unterschiede  $p < 0,001$

Über die schließende Statistik wurden signifikante Unterschiede zwischen den getesteten Strömungsgeschwindigkeiten für Lachssmolts und Blankaale nachgewiesen. In Verbindung mit der deskriptiven Auswertung, welche die Höhe der Werte bzw. das Verhältnis der Stichproben zueinander wiedergibt, ist so die Aussage möglich, dass sowohl Aale als auch Lachse bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s signifikant schneller über die Ziellinie in den Bypass eingeschwommen sind als bei 0,3 m/s.

Anhand der aufgeführten Ergebnisse lässt sich eine statistisch abgesicherte Aussage über das Einschwimmen der getesteten Fischarten in den Bypass treffen. Die inhaltli-

che Diskussion zu der projektbezogenen Fragestellung des OVeR-Projektes findet sich im Endbericht (BÖCKMANN et al. 2018a).

Die weiteren Forschungsfragen des OVeR-Projektes konnten analog zum oben beispielhaft aufgeführten Prozedere beantwortet werden.

#### 4.3.6.3 Entwicklung und Anwendung einer Auswertesoftware

Für eine detaillierte statistische Auswertung der ethohydraulischen Daten des OVeR-Projektes wurde eine Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Statistik der Ludwig-Maximilians-Universität München (Prof. Dr. Göran Kauermann) initiiert. Im Rahmen eines Consulting-Projektes wurde ein Tool entwickelt, das eine automatisierte Auswertung der aufgenommenen ethohydraulisch zählbaren Ereignisse ermöglichte und damit die Datenauswertung insgesamt erleichterte.

##### Fragestellungen

Die Grundlage für die Entwicklung der Auswertesoftware bildete eine Fragestellung (F, s. u.), die unter zwei verschiedenen Gesichtspunkten beantwortet werden sollte.

F: Gibt es einen Unterschied in der Effizienz des Einschwimmens in einen seitlichen Bypass in Abhängigkeit von verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten im Bypasseingang (0,3 | 0,5 m/s)? Als Maß für die Effizienz galt das Überschwimmen der Ziellinie im Bypass, ermittelt durch die Häufigkeit dieses Ereignisses (F1) und die Zeit bis zu seinem Eintreten (F2).

F1: Gibt es einen Unterschied in Bezug auf die Häufigkeit der Ziel-Ereignisse in Abhängigkeit von verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten im Bypasseingang? Relevant ist ausschließlich die binäre Komponente: Überschwimmen der Ziellinie: ja / nein.

F2: Gibt es einen Unterschied in Bezug auf die Zeit bis zum Überschwimmen der Ziellinie in Abhängigkeit von verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten im Bypasseingang? Relevant ist die zeitliche Komponente: Zeit bis zum Überschwimmen der Ziellinie.

Die Fragestellungen wurden mithilfe der Auswertesoftware zum einen auf deskriptiver Weise, zum anderen mittels schließender Statistik beantwortet (Abb. 4-48).

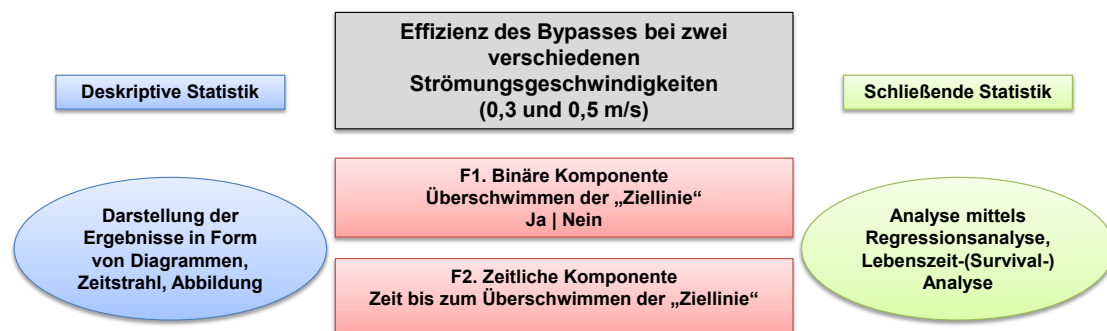


Abb. 4-48: Bearbeitung der Fragestellungen mithilfe der automatischen Auswertesoftware auf Ebene der deskriptiven und der schließenden Statistik

### Allgemeine Informationen zur Software-Anwendung

Die Arbeiten des Consulting-Projektes mündeten in einer Anwendung, welche die Auswertung zählbarer ethohydraulischer Daten automatisiert. Die Anwendung wurde mittels der frei verfügbaren Programmiersprache *R* (R CORE TEAM 2017) entwickelt. In Verbindung mit dem Paket *shiny* (CHANG et al. 2017) war es möglich, eine interaktive Benutzeroberfläche zu generieren und so die Anwendung benutzerfreundlich zu gestalten. Mithilfe der *shiny*-Anwendung lassen sich ohne tiefergehende Programmierkenntnisse Daten interaktiv analysieren. Eine detaillierte Beschreibung von *R* und *shiny* findet sich im Anhang A.4. Im Nachgang des Projektes wurde die Anwendung durch weitere Modifikationen, wie z. B. die Anpassung von Überschriften, Achsenbeschriftungen etc., an die spezifischen Ansprüche der Datenauswertung unter biologischen Gesichtspunkten weiter angepasst. Weiter besteht die Möglichkeit, die Anwendung stetig nach den eigenen Vorstellungen zu modifizieren, was jedoch gewisse Kenntnisse in der Programmiersprache *R* voraussetzt.

Die Erarbeitung der Auswertesoftware erfolgte am Beispiel der Daten der Lachssmolts des Moduls II (OVeR-Projekt), wobei die Anwendung aber auch die Auswertung vergleichbar aufgenommener Daten ermöglicht. So konnten auch die Daten der zusätzlich in Modul II getesteten Fischarten Rotaugen und Aal ausgewertet werden. Auch die Überprüfung weiterer Bypass-Systeme, beispielsweise eines oberflächennahen Bypasses, ist mit der Anwendung möglich.

Abb. 4-49 zeigt die Startseite der interaktiven *shiny*-Anwendung, die zunächst alle wichtigen Hintergrundinformationen enthält.



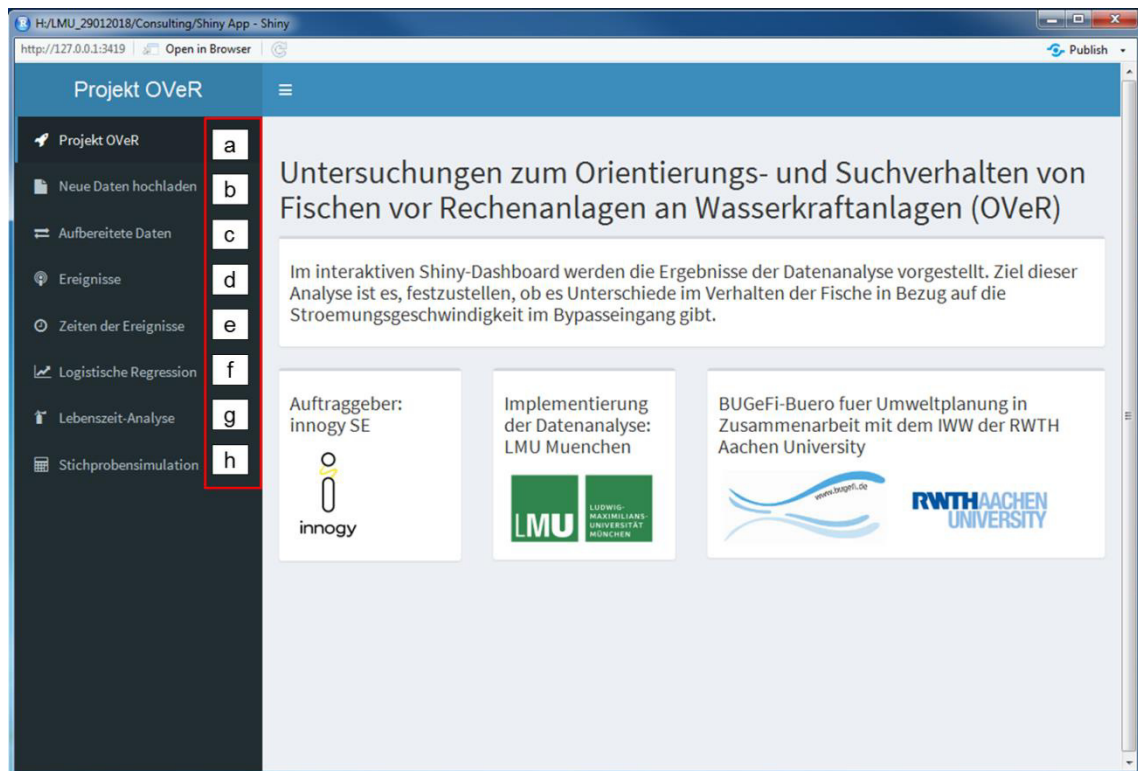


Abb. 4-49: Benutzeroberfläche mit Startseite der *shiny*-Anwendung; im linken Bereich der Oberfläche finden sich verschiedene Auswahlmöglichkeiten (a: Projekt OVeR, b: Neue Daten hochladen, c: Aufbereitete Daten, d: Ereignisse, e: Zeiten der Ereignisse, f: Logistische Regression, g: Lebenszeit-Analyse, h: Stichprobensimulation)

In den folgenden Kapiteln werden die verschiedenen Auswahlmöglichkeiten bzw. Funktionen der Software-Anwendung (Abb. 4-49b-g) in chronologischer Reihenfolge beschrieben.

#### 4.3.6.3.1 Hochladen und Aufbereiten der Daten

Um die Datenauswertung zu starten, muss in einem ersten Schritt unter dem Auswahlfeld „Neue Daten hochladen“ (Abb. 4-49b) eine Excel-Tabelle mit vorgegebener Struktur hochgeladen werden. Ein Beispiel für die Tabellenstruktur findet sich an entsprechender Stelle in der Software-Anwendung.

Um mit den Daten, die in die Anwendung eingeladen werden, weiterzuarbeiten, werden diese automatisch durch Anwählen des Buttons „Aufbereitete Daten“ bearbeitet (Abb. 4-49c). Dabei werden die Daten, die ursprünglich aus verschiedenen Tabellenblättern bestehen, automatisch aggregiert. In diesem Schritt werden diejenigen Fische, die nicht in den Versuchsbereich eingeschwommen sind und damit als unmotiviert kategorisiert wurden (vgl. Kap. 4.3.6.2), aus der weiteren Analyse ausgeschlossen. Des Weiteren werden Daten, die beispielsweise durch ein Zurückschwimmen und ein erneutes Einschwimmen von Fischen in den Bypass generiert wurden, nicht für die Auswertung genutzt. Unabhängig davon, ob ein bestimmtes Ereignis mehrfach eingetreten ist, findet jeweils nur die Zeit des erstmaligen Eintretens dieses Ereignisses Berücksichtigung. Die in der Analyse verwerteten Ereignisse waren „Überschwimmen der Startlinie“, „Überschwimmen der Bypasslinie“, „Überschwimmen der

Ziellinie“ und „Rechenpassage in das Unterwasser“. Die Tabelle mit den aufbereiteten Daten enthält letztendlich für jedes Individuum, das in den Versuchsbereich eingeschwommen ist, die jeweilige Zeit, zu der ein Ereignis erstmalig eingetreten ist. Ferner enthält der aufbereitete Datensatz eine Kennung für das jeweilige Setup (Strömungsgeschwindigkeit und Stababstand) sowie die individuellen Körperlängen und die Wassertemperatur. Zudem wird die Differenz zwischen der Zeit des Überschwimmens der Ziellinie und der Bypasslinie automatisch berechnet. Die sogenannte „Survival-Zeit“ gibt die Differenz zwischen dem Zeitpunkt des Überschwimmens der Ziellinie bzw. einer Rechenpassage und dem Zeitpunkt des ersten Überschwimmens der Startlinie wieder. Die Zeiten sind immer in Minuten angegeben.

Wie oben bereits erwähnt, ist es ebenso möglich, die für Rotaugen und Aale aufgenommenen Daten in der Software-Anwendung auszuwerten. Darüber hinaus können die getesteten Fischarten auch zusammenfassend ausgewertet werden. Die mithilfe der Auswertesoftware produzierten Ergebnisse für die getesteten Fischarten werden im Folgenden exemplarisch dargestellt.

#### **4.3.6.3.2 Deskriptive Analyse**

Die deskriptive Statistik ermöglicht einen ersten Überblick über die aufgenommenen Daten. In der Auswertesoftware werden unter dem Auswahlfeld „Ereignisse“ Graphiken dargestellt, die Bezug auf die Fragestellung F1 (s. o.) nehmen, während unter dem Auswahlfeld „Zeiten der Ereignisse“ Graphiken mit Bezug zur Fragestellung F2 (s. o.) dargestellt werden, jeweils auf deskriptiver Ebene.

##### Auswahlfeld „Ereignisse“

Abb. 4-50 zeigt beispielhaft den relativen Anteil an Lachssmolts, die über die Ziellinie („Ziel erreicht“), durch den Rechen in das Unterwasser („Rechenpassage“) oder zwar über die Startlinie in den Versuchsbereich, aber weder über die Ziellinie noch durch den Rechen geschwommen sind („kein Ereignis“).

Die Abbildung fasst alle Daten zusammen, es wird nicht zwischen den Strömungsgeschwindigkeiten im Bypasseingang und den Rechenstababständen unterschieden. Die Abbildung gibt darüber hinaus die jeweilige Anzahl an Probanden (n) in den drei aufgeführten Ereignis-Kategorien wieder.

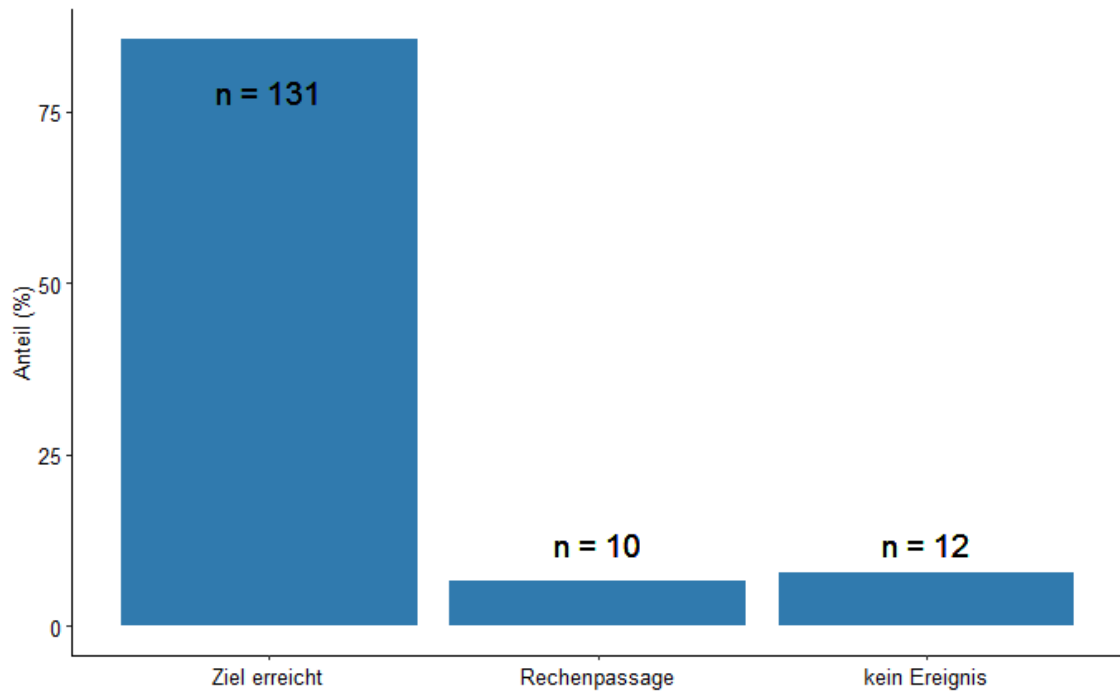


Abb. 4-50: Anteil an Lachssmolts, die im Modul II des OVeR-Projektes über die Ziellinie des seitlichen Bypasses („Ziel erreicht“), durch den Rechen ins Unterwasser („Rechenpassage“) geschwommen sind oder keines der beiden Ereignisse gezeigt haben („kein Ereignis“), n = absolute Anzahl an Lachssmolts

Weiter lassen sich mit der Anwendung die Anteile der verschiedenen Ereignisse in Abhängigkeit von den beiden getesteten Strömungsgeschwindigkeiten darstellen. Abb. 4-51 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für Aale abhängig von den Strömungsgeschwindigkeiten 0,3 und 0,5 m/s.

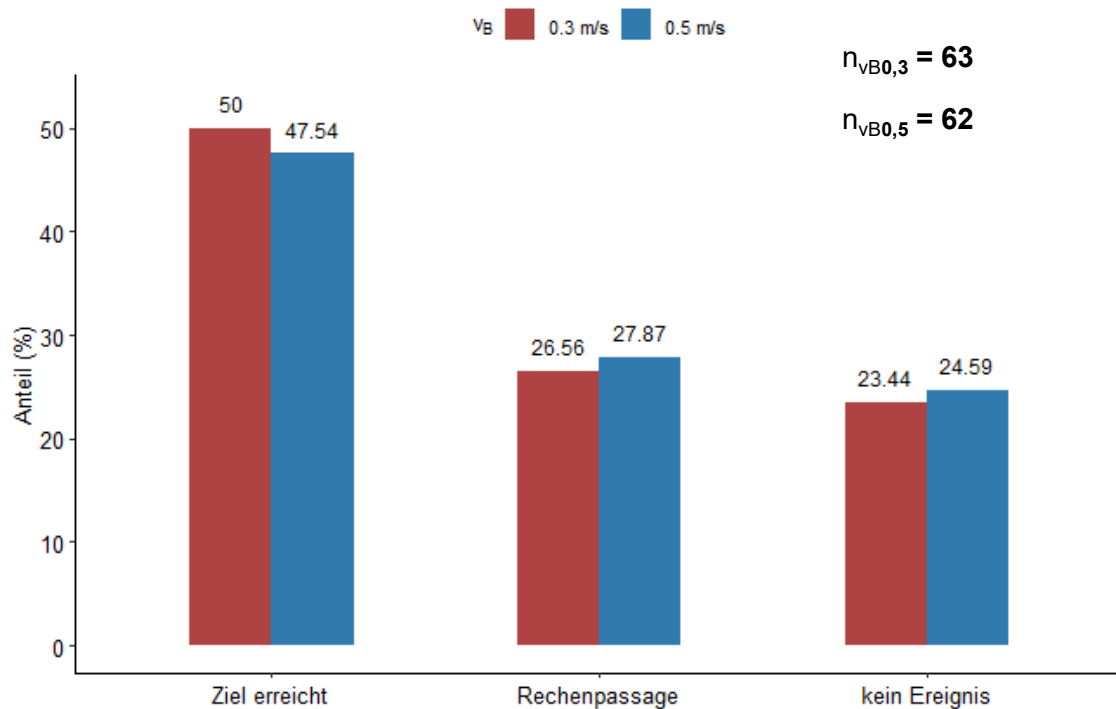


Abb. 4-51: Anteil an Aalen im Modul II des OVeR-Projektes, die über die Ziellinie des seitlichen Bypasses („Ziel erreicht“), durch den Rechen ins Unterwasser („Rechenpassage“) geschwommen sind oder keines der beiden Ereignisse gezeigt haben („kein Ereignis“), in Abhängigkeit von den getesteten Strömungsgeschwindigkeiten,  $n$  = Anzahl getesteter Probanden für die jeweilige Strömungsgeschwindigkeit

Eine Darstellung, wie sie in Abb. 4-51 gezeigt wird, kann nur einen ersten Überblick über die Ergebnisse geben, da hier verschiedene Setups zusammengefasst werden. Eine differenziertere Betrachtung, die beispielsweise zwischen den verschiedenen Rechenstababständen unterscheidet, kann so noch nicht erfolgen. Damit die Information über den Rechenstababstand ebenfalls bewertet werden kann, gibt es eine weitere Darstellungsweise. Abb. 4-52 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Aale (Abb. 4-52a) sowie der Rotaugen (Abb. 4-52b); neben der Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten werden die Ergebnisse weiter in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Stababständen dargestellt.

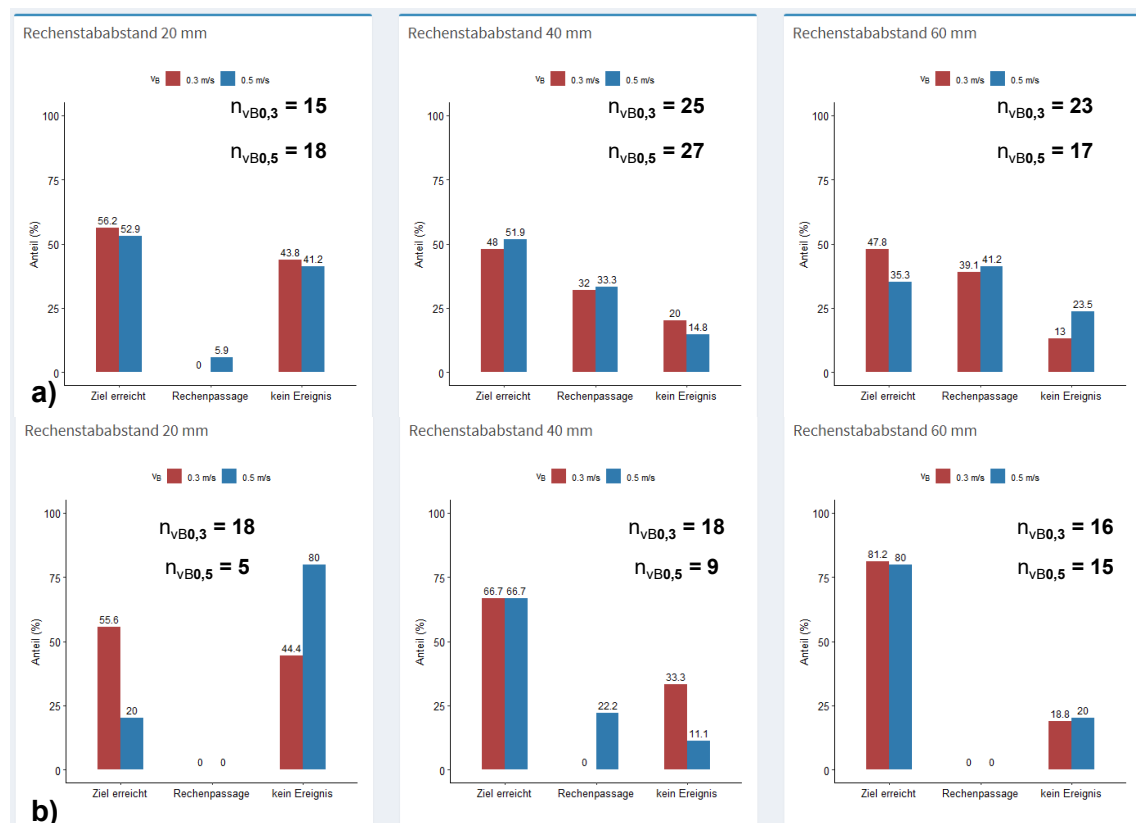


Abb. 4-52: Anteil an a) Aalen und b) Rotaugen im Modul II des OVeR-Projektes, die über die Ziellinie des seitlichen Bypasses („Ziel erreicht“) oder durch den Rechen ins Unterwasser („Rechenpassage“) geschwommen sind oder keines der beiden Ereignisse gezeigt haben („kein Ereignis“), abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und dem Rechenstababstand, n = Anzahl getesteter Probanden

Eine weitere Darstellungsform der deskriptiven Statistik findet sich in Abb. 4-53. Hier wird lediglich das Ereignis „Ziel erreicht“ in Abhängigkeit von den Parametern Stababstand und Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Darüber hinaus ist - unabhängig vom Stababstand - der durchschnittliche Anteil der über die Ziellinie geschwommenen Probanden dargestellt, was wiederum eine Fokussierung auf den Faktor Strömungsgeschwindigkeit erlaubt.

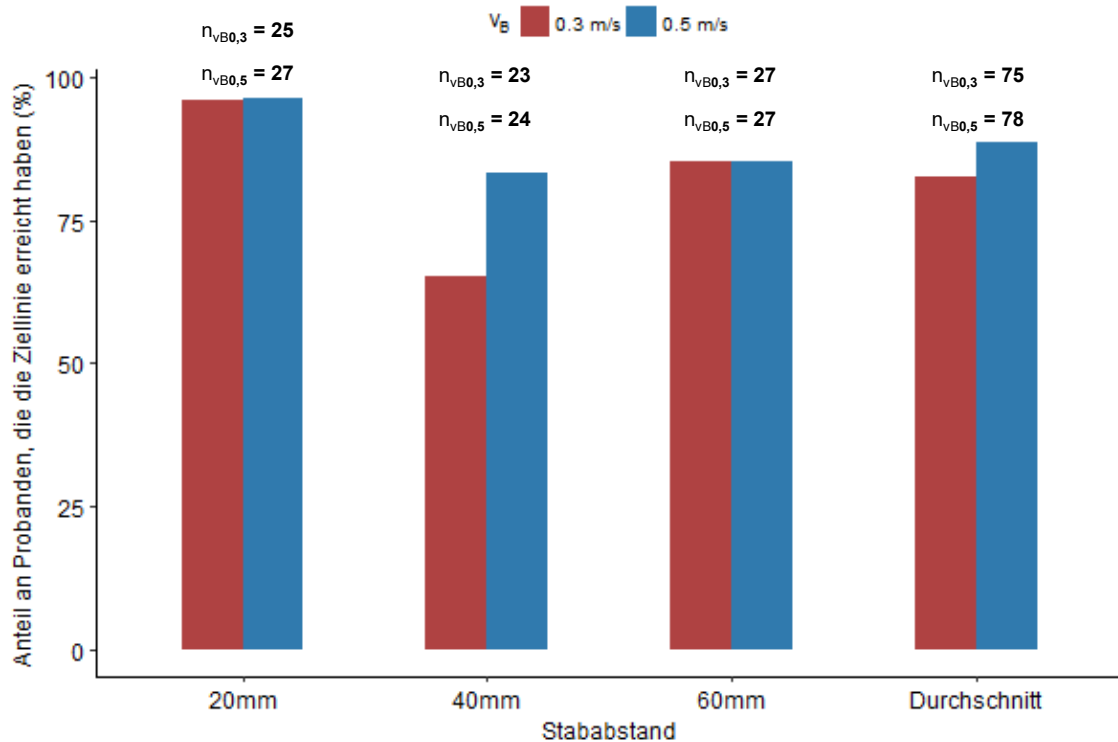


Abb. 4-53: Anteil an Lachssmolts im Modul II des OVeR-Projektes, die die Ziellinie des seitlichen Bypasses („Ziel erreicht“) erreicht haben, abhängig von der getesteten Strömungsgeschwindigkeit und dem Rechenstababstand sowie unabhängig vom Rechenstababstand (Durchschnitt), n = Anzahl getesteter Probanden

#### Auswahlfeld „Zeiten der Ereignisse“

Für die Darstellung der Zeit bis zum Eintreten eines Ereignisses bietet die Software-Anwendung zwei verschiedene Auswertungsmöglichkeiten, bei denen sich der Rahmen des betrachteten Zeitintervalls unterscheidet. Abb. 4-54 gibt die erste Möglichkeit wieder, bei der die gesamte Dauer eines Versuchsdurchgangs (hier: 30 Minuten) betrachtet wird.

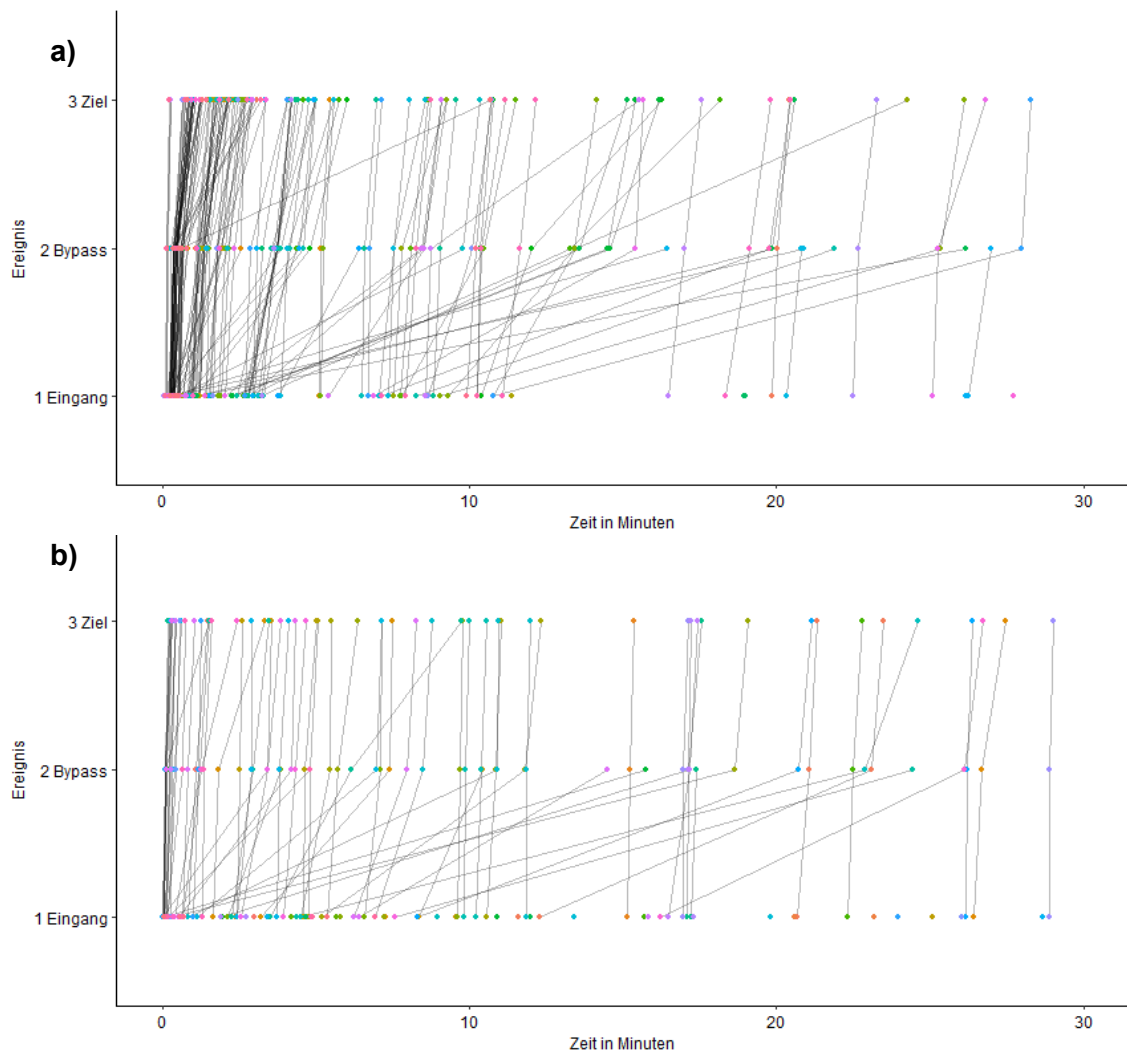


Abb. 4-54: Zeitpunkte der Ereignisse „1 Eingang“ (Überschwimmen der Startlinie), „2 Bypass“ (Überschwimmen der Bypasslinie) und „3 Ziel“ (Überschwimmen der Ziellinie) nach Versuchsstart für a) Lachse und b) Aale im Modul II des OVeR-Projektes; die individuellen Ereignis-Zeitpunkte der einzelnen Probanden sind zur besseren visuellen Unterscheidung farblich markiert

Bei der ersten Möglichkeit wird die absolute Zeit in Minuten der jeweiligen Ereignisse „1 Eingang“ (Fisch schwimmt in den Versuchsbereich ein), „2 Bypass“ (Fisch schwimmt über die Bypasslinie) und „3 Ziel“ (Fisch schwimmt über die Ziellinie) innerhalb der Versuchszeit von 30 Minuten dargestellt. Diese Form der Darstellung gibt einen ersten Überblick über das Schwimmverhalten der Fische, beispielsweise wie schnell die Fische nach Versuchsbeginn in den Versuchsbereich geschwommen sind.

Unterschiede zwischen verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten oder einzelnen Arten können durch das Vergleichen der jeweiligen Abbildungen deutlich gemacht werden. Abb. 4-54 zeigt beispielsweise, dass ein Großteil der getesteten Lachssmolts innerhalb der ersten zehn Minuten der Versuchszeit in den Bypass und über die Ziellinie geschwommen sind, während die untersuchten Aale erst relativ spät aus dem Startbereich in den Versuchsbereich eingeschwommen sind. Bei beiden Fischarten

können Individuen identifiziert werden, die sich relativ lange im Versuchsbereich aufhielten, bevor sie über die Bypasslinie geschwommen sind.

Die zweite Darstellungsweise betrachtet nur den Zeitraum zwischen dem erstmaligen Überschwimmen der Startlinie und dem Erreichen des Ziels, wobei der Zeitpunkt des Einschwimmens in den Versuchsbereich gleich „0“ gesetzt wird. Diese Normierung erleichtert den Vergleich der individuellen Ereigniszeiten im eigentlichen Versuchszeitraum.

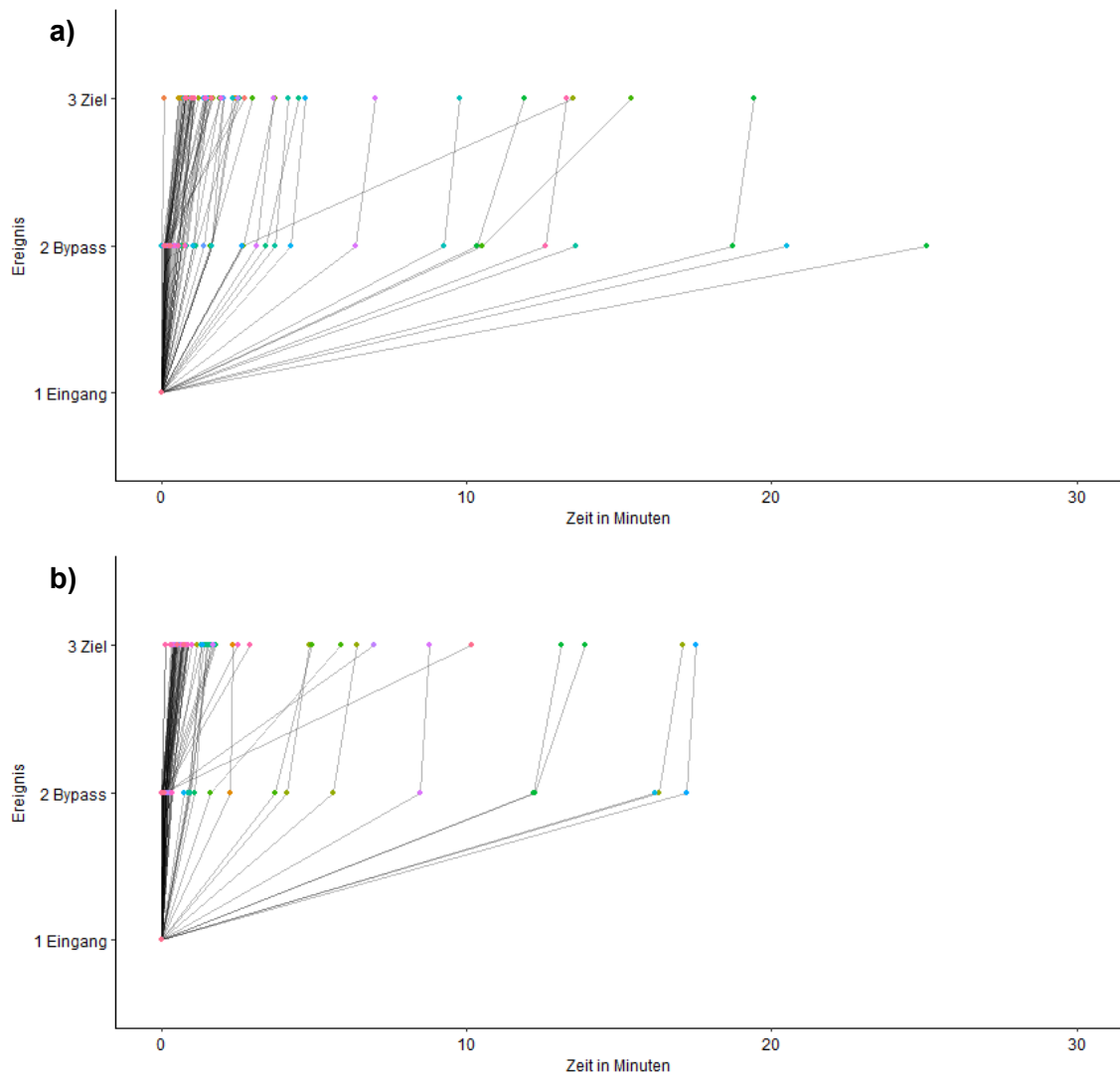


Abb. 4-55: Zeiten der Ereignisse „1 Eingang“ (Überschwimmen der Startlinie), „2 Bypass“ (Überschwimmen der Bypasslinie) und „3 Ziel“ (Überschwimmen der Ziellinie), wobei das Überschwimmen der Startlinie auf den Zeitpunkt „0“ gesetzt wurde, für Lachse bei einer Strömungsgeschwindigkeit im Bypasseingang von a) 0,3 m/s und b) 0,5 m/s im Modul II des OVeR-Projektes; die individuellen Ereignis-Zeitpunkte der einzelnen Probanden sind zur besseren visuellen Unterscheidung farblich markiert

Abb. 4-55 zeigt das Schwimmverhalten von Lachsen bei den Strömungsgeschwindigkeiten 0,3 und 0,5 m/s. Hier zeigt sich, dass der Großteil der untersuchten Lachse bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s vergleichsweise schnell vom Versuchsbereich in den Bypass und über die Ziellinie geschwommen ist,



während die Fische bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,3 m/s durchschnittlich mehr Zeit benötigten (vgl. Abb. 4-55). Anhand dieser deskriptiven Darstellung lässt sich zwar ein Unterschied erkennen, um diesen aber wirklich nachzuweisen, ist eine schließende Statistik erforderlich.

#### 4.3.6.3.3 Schließende Statistik

Über die schließende Statistik können die ggf. in der deskriptiven Darstellung sichtbaren Unterschiede zwischen verschiedenen Behandlungen auf Signifikanz getestet werden, so dass daraus Rückschlüsse abgeleitet werden können, die zur Beantwortung einer bestimmten Fragestellung beitragen. Zur Beantwortung der im Modul II des OVeR-Projektes behandelten Fragestellungen wurde die schließende Statistik angewandt (vgl. Kap. 4.3.6.3). Um die erste Fragestellung zu beantworten, welche die binäre Variable des Eintretens bzw. Nicht-Eintretens eines Ereignisses (Überschwimmen der Ziellinie bzw. Rechenpassage) untersuchte, wurde eine logistische Regression angewendet. Für die Beantwortung der zweiten Fragestellung, welche die zeitliche Komponente untersuchte, wurde eine sog. Lebenszeit-Analyse durchgeführt. Beide Methoden werden im Folgenden näher beschrieben.

#### Logistische Regression

Regressionen sind Verfahren der schließenden Statistik, die es ermöglichen, den Einfluss einer oder mehrerer unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable zu bestimmen (BACKHAUS et al. 2016). Das lineare Regressionsmodell ist insbesondere für stetige Zielvariablen (z. B. Zusammenhang Eiweißgehalt im Futter und Körpergewicht des Fisches) geeignet (Formel (3)). Handelt es sich bei der abhängigen Variable ( $y_i$ ) um eine binäre Kategorie (z. B. 1 = Ereignis tritt ein, 0 = Ereignis tritt nicht ein), lässt das lineare Modell für die Zielvariable auch Werte über 1 und unter 0 zu (Abb. 4-56).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p \quad (3)$$

Mit:	$y_i$	=	lineares Regressionsmodell
	$\beta_0$	=	Regressionskonstante (auch Intercept)
	$\beta_p$	=	Regressionskoeffizienten
	$x_p$	=	unabhängige Einflussgröße (z. B. Strömungsgeschwindigkeit, Wassertemperatur o.ä.)

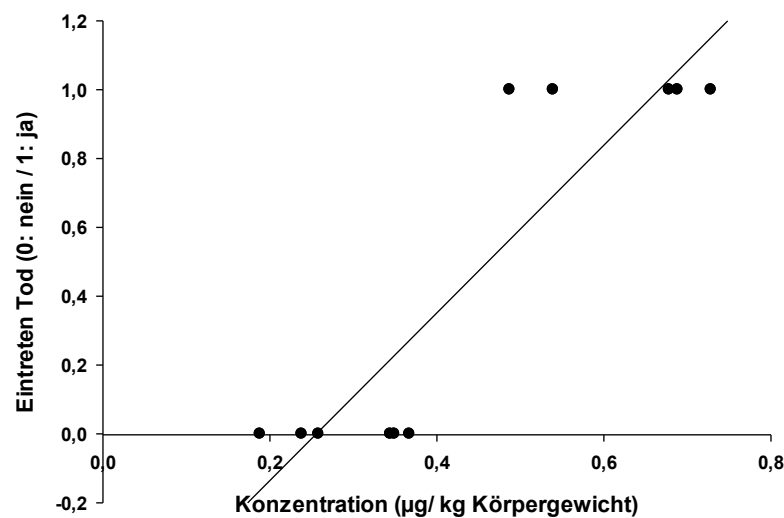


Abb. 4-56: Beispiel einer linearen Regressionsfunktion bei binärer abhängiger Variable

Generalisierte lineare Modelle (GLM) bieten die Möglichkeit, eine logistische Verteilungsfunktion (Formel (4)) anzuwenden, die den unbeschränkten Wertebereich  $[-\infty, +\infty]$  der linearen Regression auf den Wertebereich von 0 bis 1 transformiert (BACKHAUS et al. 2008; Abb. 4-57). Anders als bei der linearen Regression, werden die Werte jedoch nicht direkt geschätzt, sondern es wird die Wahrscheinlichkeit ( $\pi$ ), mit der das Ereignis eintritt (allgemein bezeichnet als  $P(y=1)$ ) in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen bestimmt (BACKHAUS et al. 2008, FAHRMEIR et al. 2009, BEHNKE 2015).

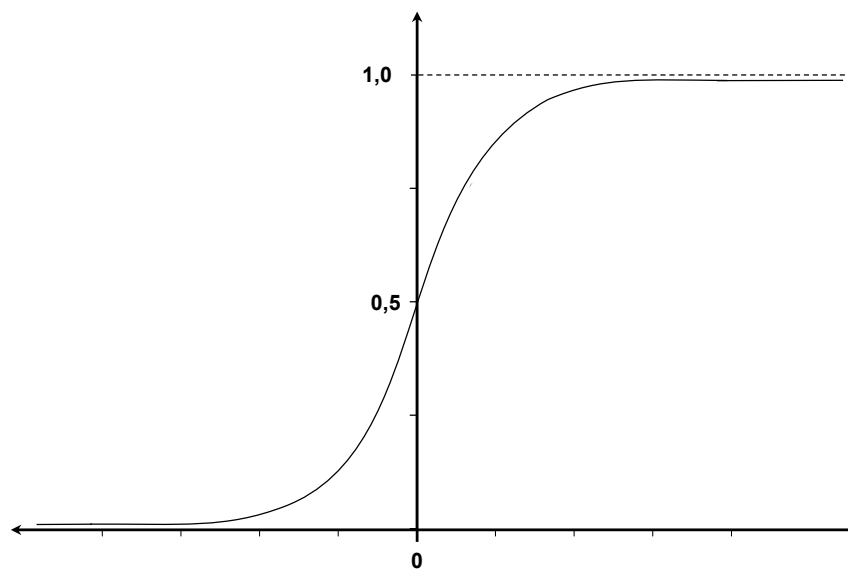


Abb. 4-57: Verlauf der logistischen Regressionsfunktion

$$h(\eta_i) = \frac{\exp(\eta_i)}{1 + \exp(\eta_i)} = \pi_i \quad (4)$$

Mit:	$h(\eta_i)$	=	logistische Verteilungsfunktion
	$\exp$	=	$e^{\eta_i}$ mit e (Eulersche Zahl)
	$\eta_i$	=	$\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p$ , aggregierte Einflussstärke
	$\beta_0$	=	Regressionskonstante (auch Intercept)
	$\beta_p$	=	Regressionskoeffizienten
	$x_p$	=	unabhängige Einflussgröße (z. B. Strömungsgeschwindigkeit, Wassertemperatur o.ä.)
	$\pi_i$	=	Eintrittswahrscheinlichkeit, $P(Y=1)$

$\eta$  wird auch als sog. linearer Prädiktor bezeichnet und kann als aggregierte Einflussstärke der unabhängigen Variablen interpretiert werden. Die Regressionskoeffizienten  $\beta$  spiegeln dabei den Einfluss einer unabhängigen Variable auf die Höhe der Eintrittswahrscheinlichkeit wider (BACKHAUS et al. 2008). Durch die Inverse der logistischen Verteilungsfunktion erhält man die Linkfunktion, die auch als Logit-Link bezeichnet wird, da sie eine Verknüpfung zwischen der Eintrittswahrscheinlichkeit  $\pi_i$  und den unabhängigen Einflussgrößen ( $x_p$ ) darstellt (vgl. Formel (5)).

$$g(\pi_i) = h^{-1}(\pi_i) = \ln \frac{\pi_i}{1 - \pi_i} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p = \eta_i \quad (5)$$

Mit:	$g(\pi_i)$	=	Logit-Link
	$h^{-1}(\pi_i)$	=	Inverse der logistischen Verteilungsfunktion
	$\pi_i$	=	Eintrittswahrscheinlichkeit, $P(Y=1)$
	$\beta_0$	=	Regressionskonstante (auch Intercept)
	$\beta_p$	=	Regressionskoeffizienten
	$x_p$	=	unabhängige Einflussgröße (z. B. Strömungsgeschwindigkeit, Wassertemperatur o.ä.)

Die Regressionskoeffizienten  $\beta_p$  sind aufgrund des nichtlinearen Einflusses der unabhängigen Variablen auf die Eintrittswahrscheinlichkeit nur indirekt zu interpretieren (BACKHAUS et al. 2008). Dabei geben die Vorzeichen der einzelnen Koeffizientenschätzer Hinweise auf die Wirkungsrichtung. Bei positivem Vorzeichen bzw. negativem Vorzeichen steigt bzw. sinkt die Wahrscheinlichkeit, mit der das Ereignis eintritt (vgl. Tab. 4-8). Darüber hinaus können bei der Berechnung der sog. Odds (vgl. Formel (6)) durch Exponenzieren der Koeffizienten Rückschlüsse auf die sog. Chance des Eintretens eines Ereignisses gezogen werden (BACKHAUS et al. 2008, FAHRMEIR et al. 2009).

$$Odds = \frac{P(Y = 1)}{P(Y = 0)} = \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p) \quad (6)$$

Mit: Odds = Chance, Wahrscheinlichkeitsverhältnis, dass das Ereignis  $y=1$  im Vergleich zum Ereignis  $y=0$  eintritt

$P(Y=1)$  Wahrscheinlichkeit, mit der das Ereignis eintritt

$P(Y=0)$  Wahrscheinlichkeit, mit der das Ereignis nicht eintritt

$\exp$  =  $e^{\beta_0 + \dots + \beta_p x_p}$  mit  $e$  (Eulersche Zahl)

$\beta_0$  = Regressionskonstante (auch Intercept)

$\beta_p$  = Regressionskoeffizienten

$x_p$  = unabhängige Einflussgröße (z. B. Strömungsgeschwindigkeit, Wassertemperatur o.ä.)

Tab. 4-8: Auswirkungen positiver und negativer Regressionskoeffizienten auf die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses  $P(Y=1)$  (aus: BACKHAUS et al. 2008, verändert), mit  $\exp = e^{\beta_0 + \dots + \beta_p x_p}$  mit  $e$  (Eulersche Zahl)

Regressionskoeffizient $\hat{\beta}$	Chance $\frac{P(Y=1)}{P(Y=0)}$	Eintrittswahrscheinlichkeit $\pi$ , $P(Y=1)$
positives Vorzeichen ( $>0$ )	steigt um $\exp(\hat{\beta})$	steigt
negatives Vorzeichen ( $<0$ )	sinkt um $\exp(\hat{\beta})$	sinkt

Die einzelnen Regressionsparameter werden mittels des Maximum-Likelihood-Verfahrens (iterativer Algorithmus) geschätzt. Eine als Ausgangspunkt vorgenommene Schätzung der Koeffizienten wird solange iterativ angepasst, bis keine wesentlichen Verbesserungen des Wertes der Likelihood-Funktion mehr entstehen. Ziel ist es, die Parameter so zu bestimmen, dass eine maximale Plausibilität (Likelihood), die beobachteten Erhebungsdaten zu erhalten, erlangt wird (BACKHAUS et al. 2008, 2016).

#### Anwendung im OVeR-Projekt

Für die Auswertung der OVeR-Daten wurde ein logistisches Regressionsmodell angewendet (s.o.). Neben der Strömungsgeschwindigkeit, die einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit haben kann, mit der die Fische die Ziellinie im Bypass überschwimmen, konnten im Modell weitere unabhängige Variablen ( $x$ ) berücksichtigt werden. So war es möglich, auch den Einfluss von Wassertemperatur und Körperlänge der Probanden zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in der Auswertungs-Anwendung unter dem Auswahlfeld „Logistische Regression“ dargestellt (vgl. Kap. 4.3.6.3).

Aus der Anwendung des logistischen Modells zur Untersuchung des Einflusses unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable ergeben sich bestimmte Regressionskoeffizienten  $\beta$ , auch als Koeffizientenschätzer bezeichnet. Für jeden Koeffizienten lässt sich ein Intervall darstellen, das bei unendlicher Wiederholung der Schätzung mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit den wahren Parameterwert einschließt (Konfidenzintervall). Die Konfidenzintervalle spiegeln somit die Unsicherheit der Schätzungen wider, eine 5 %ige Irrtumswahrscheinlichkeit wird berücksichtigt.

Abb. 4-58 stellt die über das logistische Regressionsmodell geschätzten Regressionskoeffizienten (Koeffizientenschätzer) mit Konfidenzintervallen für die ethohydraulischen Untersuchungen im OVeR-Projekt (Modul II) dar. Zusätzlich können die Kovariablen „Körperlänge der Probanden“ (length\_std) und „Wassertemperatur“ (temp\_std) mit in das Modell aufgenommen werden. Auf diese Weise kann der Einfluss weiterer unabhängiger Variablen auf die Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie im Bypass geschätzt werden. Die beiden Kovariablen wurden aufgrund unterschiedlicher Messeinheiten ( $^{\circ}\text{C}$ , mm) skalenunabhängig standardisiert.

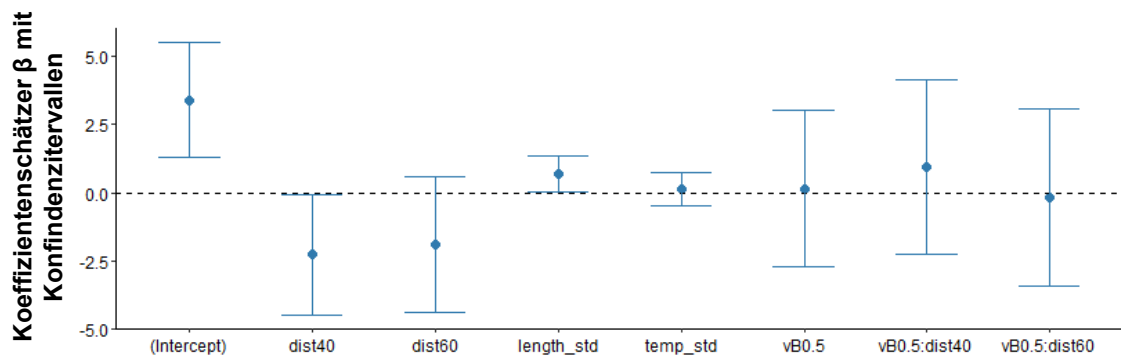


Abb. 4-58: Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie im Bypass durch Lachssmolts, dargestellt als geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervall in Abhängigkeit von verschiedenen Versuchs-Setups (vB = Strömungsgeschwindigkeit, dist = Stababstand, Intercept = Referenzkategorie), der Kovariablen Körperlänge (length\_std) und der Wassertemperatur (temp\_std); die Koeffizienten sind in Abhängigkeit vom *Intercept* zu interpretieren

Die geschätzten Koeffizienten sind in Abhängigkeit von einer Referenzkategorie, dem sogenannten *Intercept*, zu interpretieren, welcher willkürlich festgelegt wird und hier bei einem Stababstand von 20 mm und einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,3 m/s liegt. Der in Abb. 4-58 dargestellte Wert für die Referenzkategorie ist sehr hoch, da bei diesem Setup sehr viele Fische über die Ziellinie im Bypass geschwommen sind. Die übrigen Regressionsschätzer sind immer im Vergleich mit diesem Setup zu interpretieren. Wird nun beispielsweise der Stababstand von 20 mm (Referenz) auf 40 mm (dist40) erhöht, verringert sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Fische in den Bypass einschwimmen (negativer Regressionskoeffizient von dist40 mm). Liegt der jeweilige Regressionskoeffizient über 0, überschwimmen die Lachssmolts die Ziellinie mit einer höheren Wahrscheinlichkeit als im Referenz-Setup. Liegt der Koeffizient für ein bestimmtes Setup unter 0, ist die Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens geringer, liegt

er bei 0, gibt es keinen Unterschied im Vergleich zur Referenzkategorie (vgl. BACKHAUS et al. 2008). Die Unterschiede der einzelnen Setups im Vergleich mit dem *Intercept* sind dann signifikant, wenn die Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten die Null-Linie nicht mehr schneiden; erst dann wird von einem sich signifikant von Null unterscheidenden Schätzer im Vergleich zum Referenz-Setup gesprochen.

Im vorliegenden Beispiel ist die Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie im Bypass durch Lachssmolts bei einem Rechenstababstand von 40 mm also signifikant geringer als bei einem Stababstand von 20 mm, da der Regressionskoeffizient (inklusive der dazugehörigen Konfidenzintervalle) des entsprechenden Setups („dist40“) unterhalb des Wertes 0 liegt. Darüber hinaus geht aus der Abbildung hervor, dass die Wassertemperatur keinen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit einer Zielerreichung hatte, wohingegen die Körpergröße der Fische einen signifikanten Einfluss hatte. Größere Lachse finden häufiger den Bypass und schwimmen über die Ziellinie (positiver Koeffizientenschätzer).

Eine Differenzierung der Regressionswerte nach den verschiedenen Stababständen kann ebenfalls über logistische Modelle erfolgen (Abb. 4-59), diese Darstellung ist bisher noch nicht in der Auswertesoftware implementiert. Die Referenzkategorie bildete hier jeweils das Setup mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,3 m/s im Bypasseingang. Unterschiede zwischen den einzelnen Rechenstababständen können mit diesen Modellen allerdings nicht geschätzt werden.

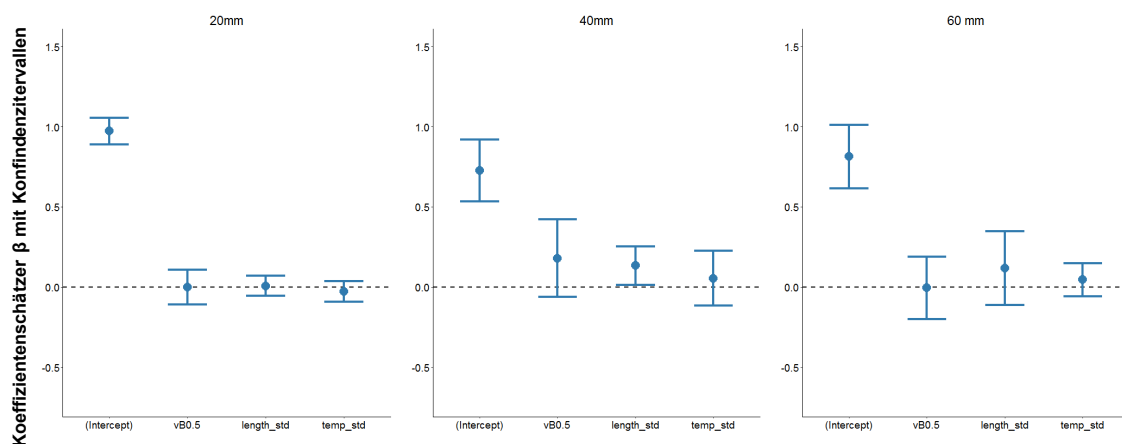


Abb. 4-59: Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie durch Lachssmolts getrennt nach dem Rechenstababstand, dargestellt als geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervall für die einzelnen Versuchs-Setups (vB = Strömungsgeschwindigkeit, dist = Stababstand, Intercept = Referenzkategorie) und der Kovariablen Körperlänge (length\_std) und Wassertemperatur (temp\_std); die Koeffizienten sind in Abhängigkeit vom *Intercept* zu interpretieren

Abb. 4-59 zeigt auf, dass die Körperlänge der Probanden bei einem Rechenstababstand von 40 mm einen signifikanten Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie hatte. Für die übrigen Setups konnten hingegen keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

In der Software-Anwendung wird neben den Regressionskoeffizienten außerdem das Ergebnis der logistischen Funktion dargestellt, wie in Abb. 4-60 beispielhaft aufgeführt. Hier wird die Wahrscheinlichkeit ( $\pi$ ) des Überschwimmens der Ziellinie wiedergegeben. Der Wahrscheinlichkeitswert unterstützt dabei die über die Regressionskoeffizienten ermittelten Ergebnisse. So wird hier beispielsweise ein deutlicher Unterschied in der Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie zwischen den Stababständen 20 und 40 mm bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,3 m/s sichtbar.

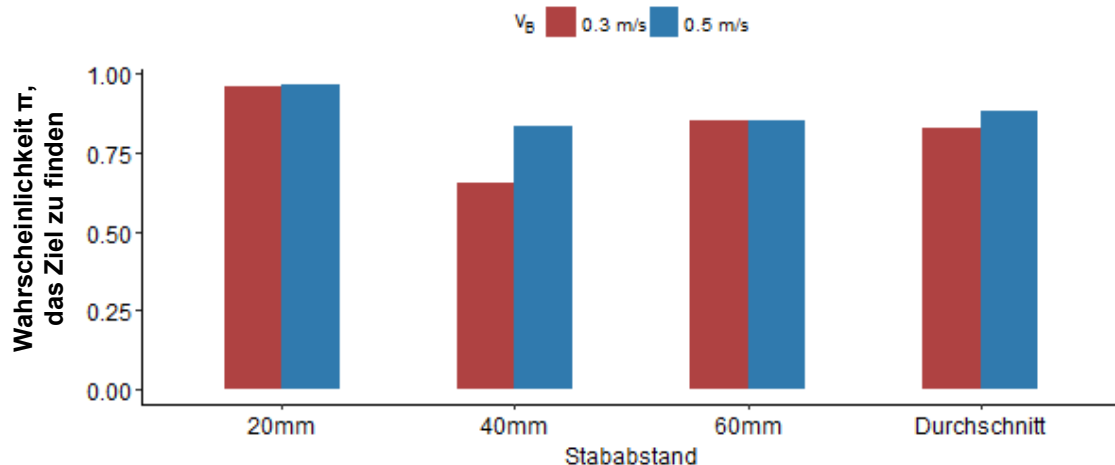


Abb. 4-60: Über ein logistisches Regressionsmodell berechnete Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie im Bypass durch Lachssmolts für die Strömungsgeschwindigkeiten 0,3 und 0,5 m/s in Abhängigkeit vom Stababstand sowie im Durchschnitt

### Zusammenfassung

Mittels logistischer Regressionsmodelle können sowohl prognostizierte Wahrscheinlichkeiten im Vergleich zu einem Referenz-Setup als auch vorhandene signifikante Unterschiede zwischen verschiedenen Setups untersucht werden. Es sei hier jedoch darauf hingewiesen, dass nicht signifikante Schätzungen mit großer Vorsicht zu interpretieren sind und Aussagen zum Forschungsgegenstand nur mit Vorbehalten zulassen.

## Lebenszeit-Analyse

Die Lebenszeit-Analyse oder auch Survival-Analyse ist ein statistisches Verfahren, bei dem die Zeit bis zum Eintreten eines bestimmten Ereignisses zwischen Gruppen verglichen wird (ZIEGLER et al. 2002, WINDZIO 2013). Eine zentrale Größe dieser Analyse ist die sogenannte Hazard-Rate (vgl. Formel (7)). Die Rate gibt die Wahrscheinlichkeit wieder, mit der ein Ereignis zum Zeitpunkt  $t$  eintritt, unter der Voraussetzung, dass es bis zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$  noch nicht eingetreten ist (WINDZIO 2013). Die Lebenszeit-Analyse hat ein breites Anwendungsfeld und wird z. B. häufig in klinischen Studien verwendet, um die Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer Erkrankung oder der Genesung bis zu einem bestimmten Zeitpunkt zu errechnen (PUTTER et al. 2007).

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \downarrow 0} \frac{\text{Prob}(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t} \quad (7)$$

Mit:	$\lambda(t)$	=	Hazard-Rate
	Prob	=	Wahrscheinlichkeit
	$t$	=	Start-Zeit
	$T$	=	Zeitpunkt des Ereigniseintritts (Überschwimmen der Ziellinie bzw. Rechenpassage)
	$t + \Delta t$	=	Zeit, die sich dem Ende des Versuches nähert
	$\Delta t$	=	Zeit, die gegen 0 geht (Ende des Versuches 30 Minuten)

### Anwendung im OVeR-Projekt

Durch Anwendung der Lebenszeit-Analyse auf die Daten des OVeR-Projekts lassen sich Einschwimm-Ereignisse der Fische in den Bypass in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit über den zeitlichen Verlauf der ethohydraulischen Untersuchungen vergleichen und auf signifikante Unterschiede hin untersuchen. So lässt sich beispielsweise ermitteln, ob die Fische bei einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit schneller den Bypass auffinden und über die Ziellinie schwimmen. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in der Auswertungs-Anwendung unter dem Auswahlfeld „Lebenszeit-Analyse“ dargestellt.

### Elemente der Lebenszeit-Analyse

Die in der Auswertungs-Anwendung durchgeführten Lebenszeit-Analysen sind die 1) *Kumulative Inzidenzrate*, das 2) *Cox-Modell mit eventspezifischen Hazard-Raten* sowie die 3) *Kumulative Inzidenzrate mit geschätztem Kovariablen-Einfluss*, welche im Folgenden näher beschrieben werden.



1) Kumulative Inzidenzrate  $I_k(t)$ Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen über die Zeit  $t$ .

In der automatischen Auswertungs-Anwendung wird zunächst die kumulative Inzidenzrate dargestellt, bei der die zeitliche Dimension (Ereignisse über den Versuchsverlauf) berücksichtigt wird (PUTTER et al. 2007). Die Inzidenzrate  $I_k(t)$  beschreibt die Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen  $k$  (hier: Schwimmen über die Ziellinie oder Rechenpassage) über die Zeit  $t$  (s. Formel (8)). Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist dabei mit dem relativen Anteil an Fischen, der bis zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  ein bestimmtes Ereignis zeigte (hier: Schwimmen über die Ziellinie oder Rechenpassage), gleichzusetzen.

$$I_k(t) = \sum_{j:t_j \leq t} \frac{d_{kj}}{n_j} * \hat{S}(t_{j-1}) \quad (8)$$

Mit:

- $I_k(t)$  = Kumulative Inzidenzrate
- $d_{kj}$  = Anzahl an Fischen, die zum Zeitpunkt  $t_j$ , ein Ereignis  $k$  (Ziel erreicht, Rechenpassage) zeigten
- $n_j$  = Anzahl an Fischen im Versuch, die bis zum Zeitpunkt  $t_j$  noch kein Ereignis gezeigt haben
- $\hat{S}(t_{j-1})$  = geschätzter Anteil an Fischen, die noch im Versuch sind, zum Zeitpunkt  $(t_{j-1})$  mit  $1 - \frac{d_j}{n_j}$ ;  $d_j$ : gesamte Anzahl an Fischen, die ein Ereignis  $k$  zeigten

Abb. 4-61 zeigt beispielhaft die Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses „Überschwimmen der Ziellinie“ in Abhängigkeit von der verstrichenen Versuchszeit für die Fischarten Lachs und Aal. Die dargestellten Konfidenzintervalle (blaue bzw. rote Flächen) quantifizieren die mit der Berechnung verbundene Unsicherheit. Würde das Experiment unendlich mal wiederholt werden, würden 95 % der Werte in diesem Intervall liegen. Die Konfidenzintervalle lassen sich mittels des Standardfehlers der hier dargestellten mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit berechnen (rote bzw. blaue Linie).

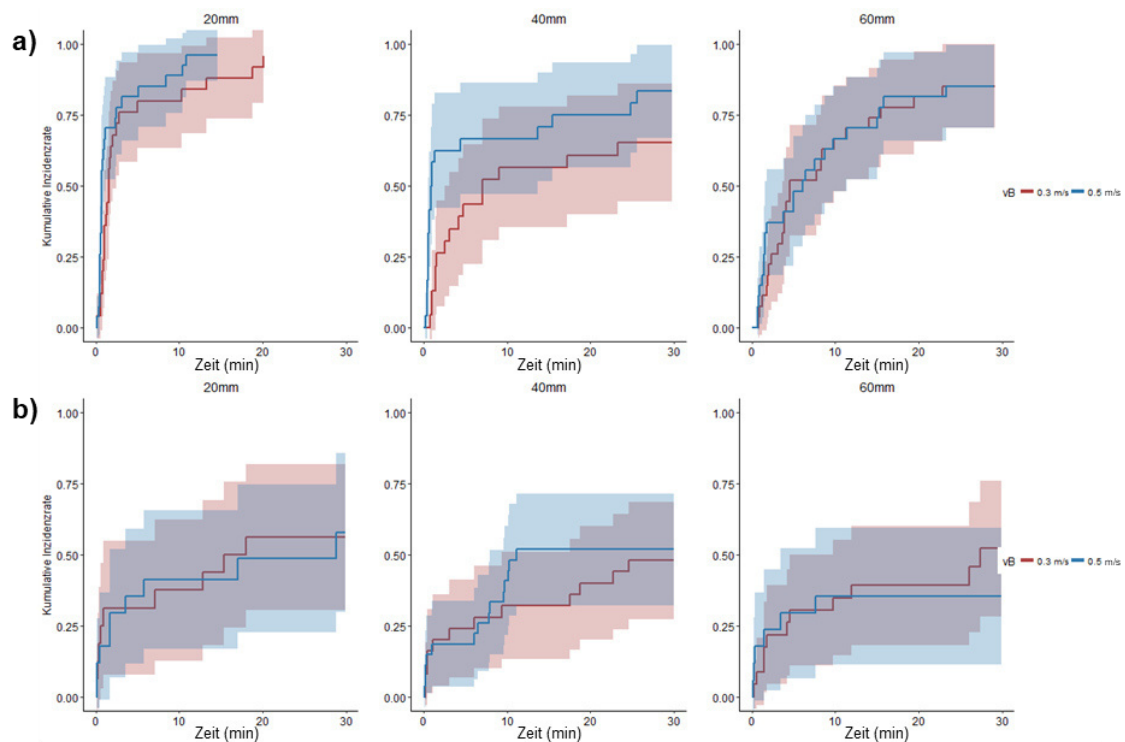


Abb. 4-61: Anteil an über die Bypass-Ziellinie geschwommenen Fischen in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei einer Strömungsgeschwindigkeit im Bypasseingang von 0,3 (rot) und 0,5 (blau) m/s, dargestellt als kumulative Inzidenzrate (Kurven) mit 95%-Konfidenzintervallen (Flächen) für a) Lachse und b) Aale für die verschiedenen Rechenstababstände (Modul II, OVeR-Projekt)

Das folgende Beispiel soll die Interpretationsweise der Darstellung veranschaulichen. Bei einer Zeit von  $t = 10$  stellt die kumulative Inzidenzrate jenen Anteil an Fischen dar, der das Ziel zwischen 0 und 10 Minuten erreicht hat. Für Lachse (Abb. 4-61a) zeigte sich beispielsweise, dass die Fische bei einem Stababstand von 20 mm früher in den Bypass eingeschwommen sind als bei den beiden anderen Stababständen: Hier lag die Wahrscheinlichkeit des Einschwimmens in den Bypass bereits nach 10 Minuten bei etwa 80 % und schon nach 20 Minuten waren alle registrierten Einschwimm-Ereignisse eingetreten. Bei einem Stababstand von 40 mm benötigten die Probanden hingegen eine längere Zeit bis zum Einschwimmen: Nach 10 Minuten lag die Wahrscheinlichkeit des Einschwimmens erst bei etwa 60 %.

Das Einschwimmen von Aalen in den Bypass war, im Vergleich zu Lachsen, insgesamt unwahrscheinlicher (Abb. 4-61b). Die relative Häufigkeit von Einschwimm-Ereignissen lag über den Versuchsverlauf bei allen Stababständen lediglich bei ca. 50 %.

Die Anwendung erstellt neben der graphischen Darstellung des zeitlichen Verlaufes zusätzlich eine Tabelle, in der mögliche signifikante Unterschiede zwischen den zeitlichen Verläufen der verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten angegeben werden. Als statistische Analyse für Inzidenzraten liegt hier der „Gray’s Test“ zugrunde. So weist Tab. 4-9 für die Ergebnisse der Lachssmolts bei einem Stababstand von 40 mm auf signifikante Unterschiede hin (Gray’s-Test,  $p < 0,05$ ). In Verbindung mit Abb. 4-61a ist zu sehen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass Fische im Versuchsverlauf in den By-

pass einschwimmen, bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s signifikant höher ist als bei 0,3 m/s.

Tab. 4-9: Ergebnisse des statistischen Tests (Gray's Test) auf Unterschiede zwischen den Strömungsgeschwindigkeiten 0,3 und 0,5 m/s im Bypasseingang hinsichtlich der relativen Häufigkeit von Einschwimmereignissen von Lachssmolts in den Bypass unter Berücksichtigung der zeitlichen Dimension für unterschiedliche Stababstände, p-Werte unter 0,05 weisen auf signifikante Unterschiede hin

	Abstand	p.Wert
1	20mm	0.09959
2	40mm	0.03744
3	60mm	0.84853

## 2) Cox-Modell mit eventspezifischen Hazard-Raten

Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses zum Zeitpunkt t unter Berücksichtigung verschiedener Kovariablen.

Es werden die Anteile der in den Bypass und durch den Rechen geschwommenen Fische bei den Berechnungen berücksichtigt, woraus sich sogenannte eventspezifische Hazard-Raten (Event 1: Überschwimmen der Ziellinie; Event 2: Rechenpassage) ergeben. In Verbindung mit sogenannten Cox-Modellen (Formel (9)) kann in der Lebenszeit-Analyse zusätzlich der Einfluss von Kovariablen auf die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses berücksichtigt werden (PUTTER et al. 2007, MOORE 2016). Das Modell nimmt für die Kovariablen an, dass diese über die gesamte Zeit konstant sind (BLOSSFELD 2010). Die entsprechende Darstellung ist analog zu jener der logistischen Regression (vgl. Abb. 4-58), allerdings ist hier zusätzlich der Faktor „Zeit“ mit eingeschlossen. Darüber hinaus wird im Cox-Modell kein *Intercept* dargestellt. Stattdessen wird der sog. Baseline-Hazard (ZIEGLER et al. 2007, BLOSSFELD 2010) als Referenzkategorie angenommen. Er gibt die Eintrittswahrscheinlichkeit für den Fall an, dass alle Einflussvariablen gleich null sind. In den vorliegenden OVeR-Untersuchungen diene das Setup mit 20 mm Rechenstababstand und 0,3 m/s Anströmgeschwindigkeit als Referenz.

$$\lambda_k(t|x_i) = \lambda_{0,k}(t) * \exp(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p) \quad (9)$$

- Mit:  $\lambda_k(t|x_i)$  = Cox-Modell mit eventspezifischen Hazard-Raten  
 $\lambda_{0,k}(t)$  = eventspezifische Baseline-Hazard  
 $\exp$  =  $e^{\beta_0 + \dots + \beta_p x_p}$  mit e (Eulersche Zahl)  
 $\beta_p$  = Regressionskoeffizienten  
 $x_p$  = unabhängige Einflussgröße (z. B. Strömungsgeschwindigkeit, Wassertemperatur,...)

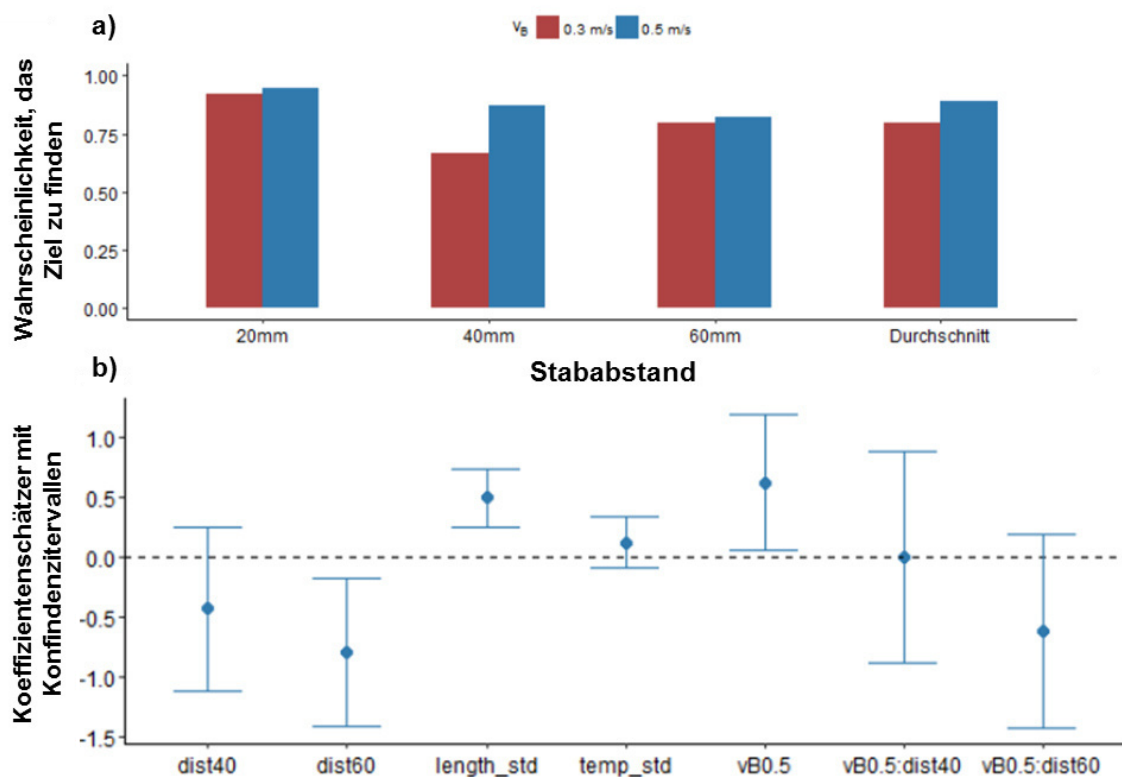


Abb. 4-62: a) Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie im Bypass durch Lachssmolts unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes für die Strömungsgeschwindigkeiten von 0,3 und 0,5 m/s in Abhängigkeit vom Stababstand sowie im Durchschnitt; Berechnung mittels Cox-Modell und eventspezifischer Hazard-Rate, b) Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie durch Lachssmolts unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes, dargestellt als geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervall für die einzelnen Versuchs-Setups (vB = Strömungsgeschwindigkeit, dist = Stababstand) und der Kovariablen Körperlänge (length\_std) und Wassertemperatur (temp\_std); die Koeffizienten sind in Abhängigkeit von der Referenzkategorie (Baseline-Hazard, nicht dargestellt) zu interpretieren

Abb. 4-62a zeigt die Wahrscheinlichkeit, das Ziel zum Zeitpunkt 30 Minuten (d. h. bis zum Versuchsende) zu finden, in Abhängigkeit von verschiedenen Strömungsge-

schwindigkeiten und Stababstände sowie unter Berücksichtigung möglicher Einflüsse der Wassertemperatur und Körperlänge der Probanden. Abb. 4-62b gibt die jeweiligen Koeffizientenschätzer der Lebenszeit-Analyse wieder.

Es zeigt sich, dass die Größe der Lachssmolts einen signifikanten Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit hat, das Ziel zu finden (Abb. 4-62b), so schwimmen größere Tiere signifikant schneller über die Ziellinie. Bei Veränderung des Rechenstababstandes von 20 auf 60 mm verringert sich die Wahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Zeit, das Ziel zu finden. Das heißt, die Fische schwimmen bei einem Stababstand von 60 mm erst später über die Ziellinie als bei 20 mm. Dagegen erhöht sich die Wahrscheinlichkeit bei einer Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit von 0,3 m/s auf 0,5 m/s signifikant. Die Fische schwimmen also bei einem Stababstand von 20 mm und 0,5 m/s signifikant schneller über die Ziellinie (positiver Koeffizientenschätzer). Dieses Ergebnis wurde zwar bereits mit dem Mann-Whitney-U-Test nachgewiesen (vgl. Kap. 4.3.6.2), der jedoch den Einfluss von Kovariablen nicht berücksichtigt. Im Vergleich mit der logistischen Regressionsanalyse (s. o.), bei welcher der zeitliche Faktor keine Berücksichtigung fand, liefert die Lebenszeit-Analyse hier zusätzliche Informationen und ermöglicht Aussagen, die allein mit der logistischen Regression nicht möglich wären.

Die Anwendung stellt weiter die Wahrscheinlichkeit einer Rechenpassage dar. Aufgrund der relativ geringen Anzahl an Rechenpassagen während der ethohydraulischen Tests im Labor sind die Ergebnisse jedoch nicht aussagekräftig und werden hier nicht weiter vorgestellt. Dies gilt für alle drei getesteten Fischarten.

Eine weitere Auswertungsmöglichkeit bietet sich in der Darstellung der Ergebnisse für die einzelnen Stababstände (Abb. 4-63). Im Versuchsssetup mit einem Rechenstababstand von 40 mm zeigt sich ein signifikanter Unterschied in der Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie abhängig von der Körpergröße der Fische. Große Fische schwimmen hierbei schneller über die Ziellinie. Darauf haben bereits die Ergebnisse im gesamtheitlichen Modell hingewiesen (Abb. 4-62b).

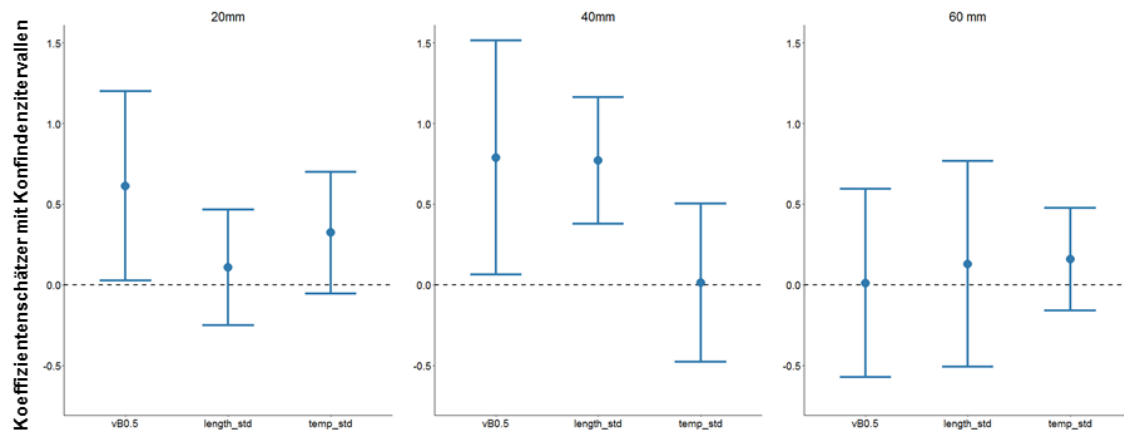


Abb. 4-63: Wahrscheinlichkeit des Überschwimmens der Ziellinie durch Lachssmolts unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes getrennt nach dem Rechenstababstand, dargestellt als geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervall für die einzelnen Versuchs-Setups (vB = Strömungsgeschwindigkeit, dist = Stababstand) und der Kovariablen Körperlänge (length\_std) und Wassertemperatur (temp\_std); die Koeffizienten sind in Abhängigkeit von der Referenzkategorie (Baseline-Hazard, nicht dargestellt) zu interpretieren

### 3) Kumulative Inzidenzrate mit Kovariablen-Einfluss

Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Ereignis vor dem Zeitpunkt t eintritt unter Berücksichtigung verschiedener Kovariablen.

Bei der Berechnung kumulativer Inzidenzraten kann zusätzlich der Einfluss von Kovariablen, wie z. B. der „Wassertemperatur“ und der „Körpergröße“ berücksichtigt werden. Dabei wird das Cox-Modell mit der eventspezifischen kumulativen Hazard-Rate, also der über die Zeit geschätzten Wahrscheinlichkeit, mit welcher ein bestimmtes Ereignis vor einem bestimmten Zeitpunkt t eintritt, verknüpft (Formel (10)).

$$I_k(t|x) = \text{Prob}(T < t, C = k|x) \quad (10)$$

Mit:

- $I_k(t|x)$  = Kumulative Inzidenzrate mit Kovariablen-Einfluss
- Prob = Wahrscheinlichkeit
- $T < t$  = das Ereignis tritt vor dem Zeitpunkt t ein
- $C = k$  = verschiedene Ereignisse k [Auffinden des Ziels; Rechenpassage]
- $x$  = unabhängige Einflussgröße (z. B. Strömungsgeschwindigkeit, Wassertemperatur,...)

Im Prinzip gibt die kumulative Inzidenzrate einen differenzierteren Überblick über den Versuchsverlauf wieder. Während die in Abb. 4-62a dargestellten Ergebnisse des Cox-

Modells mit eventspezifischen Hazard-Raten lediglich die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der die Ziellinie bis zum Versuchsende ( $t = 30$ ) passiert wurde, kann mittels der kumulativen Inzidenzrate die Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der verstrichenen Zeit dargestellt werden. Anhand der folgenden Darstellung soll dies verdeutlicht werden; Abb. 4-64a spiegelt die Wahrscheinlichkeit wider, mit der Aale bei Ende des Versuchs die Ziellinie überschwimmen. Dies entspricht dem Wert der kumulativen Inzidenzrate zum Zeitpunkt „30 Minuten“ (Abb. 4-64b). In der automatischen Anwendung können die verschiedenen Rechenstababstände einzeln oder zusammengefasst dargestellt werden.

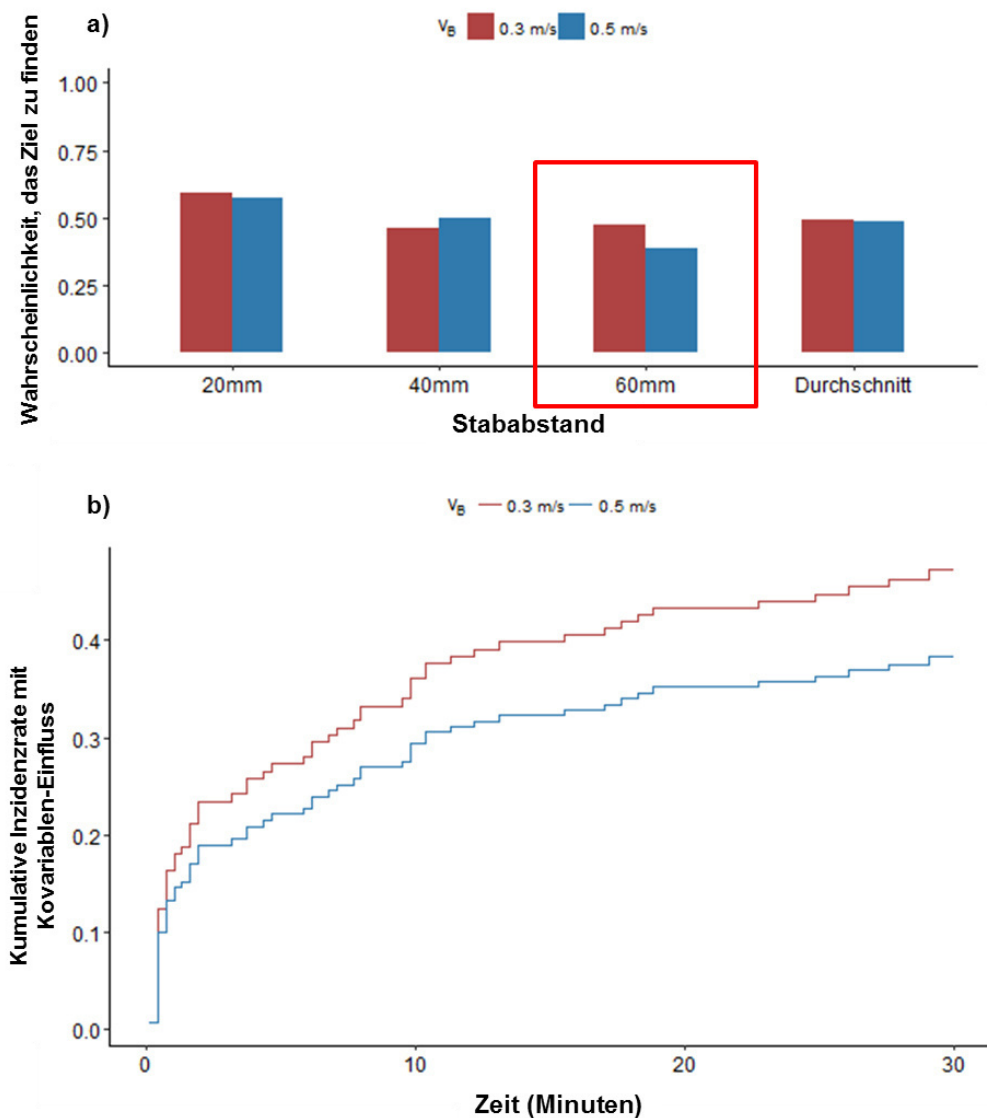


Abb. 4-64: a) Wahrscheinlichkeit, mit der Aale die Ziellinie im Bypass bis zum Versuchsende ( $t = 30$  Minuten) überschwimmen für die Strömungsgeschwindigkeiten 0,3 und 0,5 m/s in Abhängigkeit vom Stababstand sowie im Durchschnitt; Berechnung mittels Cox-Modell und eventspezifischer Hazard-Rate; roter Rahmen weist auf die Ergebnisse des 60 mm Rechens hin, b) Wahrscheinlichkeit, mit der Aale die Ziellinie im Bypass überschwimmen über den Versuchsverlauf für die Strömungsgeschwindigkeiten von 0,3 und 0,5 m/s bei einem Stababstand von 60 mm, dargestellt als kumulative Inzidenzrate mit Kovariablen-Einfluss

## Zusammenfassung

Die Lebenszeit-Analyse bietet die Möglichkeit, neben den Häufigkeiten von Ereignissen ebenfalls den zeitlichen Verlauf dieser Daten zu berücksichtigen und über schließende Statistik Unterschiede zwischen verschiedenen Setups nachzuweisen.

### **4.4 Bewertung und Fazit**

In Kapitel 4 wurden verschiedene Grundlagen und Erfahrungen erarbeitet bzw. dargestellt, welche eine standardisierte Vorgehensweise während der Planung, Durchführung und Auswertung ethohydraulischer Tests sicherstellen. Der besondere Nutzen des dargestellten Leitfadens liegt in der ergebnisorientierten Verzahnung von Versuchsdesign und statistischer Analyse. Neben der detaillierten Auflistung und Erläuterung der bei der empirischen Datenproduktion zu berücksichtigenden Parameter, werden außerdem konkrete Maßgaben zur statistischen Auswertbarkeit - und damit zu Qualität und Nutzen - der gewonnenen Daten erteilt. Mit der dargestellten Vorgehensweise wird neben der qualitativen Aufnahme reizinduzierter Verhaltensweisen also die statistische Auswertung ethohydraulisch zählbarer Ereignisse gewährleistet.

Der erarbeitete Verfahrenskatalog erhebt hierbei jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Im fortlaufenden Entwicklungsprozess sollten Erkenntnisse und Erfahrungen weiterer Arbeiten implementiert werden.

Während der Entwicklung des Katalogs hat sich gezeigt, dass, neben der Zusammenarbeit der Forschungszweige Biologie und Ingenieurwissenschaften, auch die Kooperation mit dem Bereich der Statistik wertvoll ist. So kann die Umsetzung ethohydraulischer Grundlagen von vornherein unter Berücksichtigung der statistischen Auswertbarkeit stattfinden. In Zusammenarbeit mit dem Bereich der Informatik können zudem Datenaufnahmeprotokolle zur automatisierten Aufbereitung entwickelt werden, welche die Datenerfassung vereinfachen und weiter standardisieren, was letztlich einen weiteren Qualitätsgewinn der erhobenen Daten bedeutet (vgl. auch Kap. 4.3.4).



## 5 Stichprobenplanung: Bestimmung der Anzahl an Probanden für ethohydraulische Untersuchungen

Die Stichprobengröße, also die Anzahl an Probanden, die für eine Untersuchung benötigt wird, um Effekte statistisch nachzuweisen, ist ein zentraler Faktor der Versuchsplanung (NAGUIB 2006). Im Rahmen der Stichprobenplanung wird die Frage beantwortet, wie viele Tiere für die Untersuchungen benötigt werden, um anhand einer begrenzten Anzahl an Individuen repräsentative Aussagen für eine bestimmte Gruppe, Population oder Art treffen zu können (NAGUIB 2006). Bei der Bemessung des Stichprobenumfangs ist die Waage zwischen dem Streben nach möglichst genauen und aussagekräftigen Ergebnissen auf der einen, und ethischen Gesichtspunkten sowie dem Zwang zur Wirtschaftlichkeit auf der anderen Seite, zu halten (KÖHLER et al. 2007).

Wie bereits in Kapitel 4.1.4 erläutert, ist für ethohydraulische Untersuchungen immer auch ein Antrag auf Genehmigung eines Tierversuchsvorhabens zu stellen. Im Rahmen der Antragsstellung ist dabei die Anzahl an vorgesehenen Tieren zu benennen sowie eine entsprechende Begründung statistisch herzuleiten und detailliert darzulegen (vgl. § 31 Abs. 1 Satz 2, Nr. 1c TierSchVersV oder bspw. LANUV Antrag, Pkt. 1.1.5).

Im Folgenden werden zwei verschiedene Varianten zur Bestimmung des Stichprobenumfangs vorgestellt, die auch bei ethohydraulischen Untersuchungen angewendet werden können. Bei der ersten Variante wird der Stichprobenumfang ermittelt, welcher notwendig ist, um eine zuvor definierte Häufigkeit eines bestimmten Ereignisses statistisch nachweisen zu können. Bei der zweiten Variante wird der Stichprobenumfang ermittelt, der erforderlich ist, um Unterschiede zwischen zwei Gruppen nachweisen zu können, abhängig von einem bestimmten Parameter, wie z. B. der Strömungsgeschwindigkeit. Die Grundlage für die Ermittlung des Stichprobenumfangs bildet bei beiden Varianten die Häufigkeit zählbarer Ereignisse. Anhand von Beispielen aus der Ethohydraulik werden die Varianten im Folgenden veranschaulicht.

### 5.1 Bestimmung des Stichprobenumfangs mittels eines Anteilswertes $p$ (Variante I)

Anhand der Formel (11) (vgl. KAUERMANN & KÜCHENHOFF 2011) kann der für eine bestimmte Untersuchung benötigte Stichprobenumfang relativ einfach berechnet werden. Die Anwendung der Gleichung soll an einem Fall aus der Praxis veranschaulicht werden. Beispielhaft wird hier erörtert, wie die Anzahl an Versuchsfischen bestimmt werden kann, die zum Nachweis der Funktionsfähigkeit eines bestimmten Fischliftsystems im Freiland benötigt wird:

Um die Funktionsfähigkeit des Fischliftsystems am Baldeneysee (vgl. Steckbrief 2, BÖCKMANN et al. 2015) zu validieren, soll eine Überprüfung mittels markierter Fische erfolgen. Anhand der Formel (11) ist es möglich, die Anzahl dafür benötigter Fische ( $n$ ) zu berechnen, indem der Anteil an in den Lift einschwimmenden Fischen ( $p$ ) als Maß für die Funktionsfähigkeit angegeben wird.

$$n > z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 * \frac{p(1-p)}{e^2} \quad (11)$$

[n: Stichprobenumfang, z: Quantil der Standardnormalverteilung bei  $1-\alpha/2$ ;  $\alpha$ : Fehlerwahrscheinlichkeit; p: anzunehmender Anteil; e: vorgegebene Genauigkeit der Schätzung]

Der Ausdruck  $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$  gibt das  $(1-\frac{\alpha}{2})$ -Quantil der Standardnormalverteilung an. Dabei beschreibt das Quantil die Streuung der Werte. Bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ , also einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %, entspricht dies einem Quantil von 0,975 ( $1-0,05/2$ ) der Standardnormalverteilung, demnach sind 97,5 % der Werte kleiner als das Quantil (Abb. 5-1). Dies entspricht einem z-Wert von 1,96 (vgl. KAUERMANN & KÜCHENHOFF 2011 sowie Abb. 5-1). Bei der Wahl eines strengeren Signifikanzniveaus von  $\alpha = 0,01$  würde das Quantil bei 0,995 und demnach bei einem z-Wert von 2,58 liegen (Abb. 5-1).

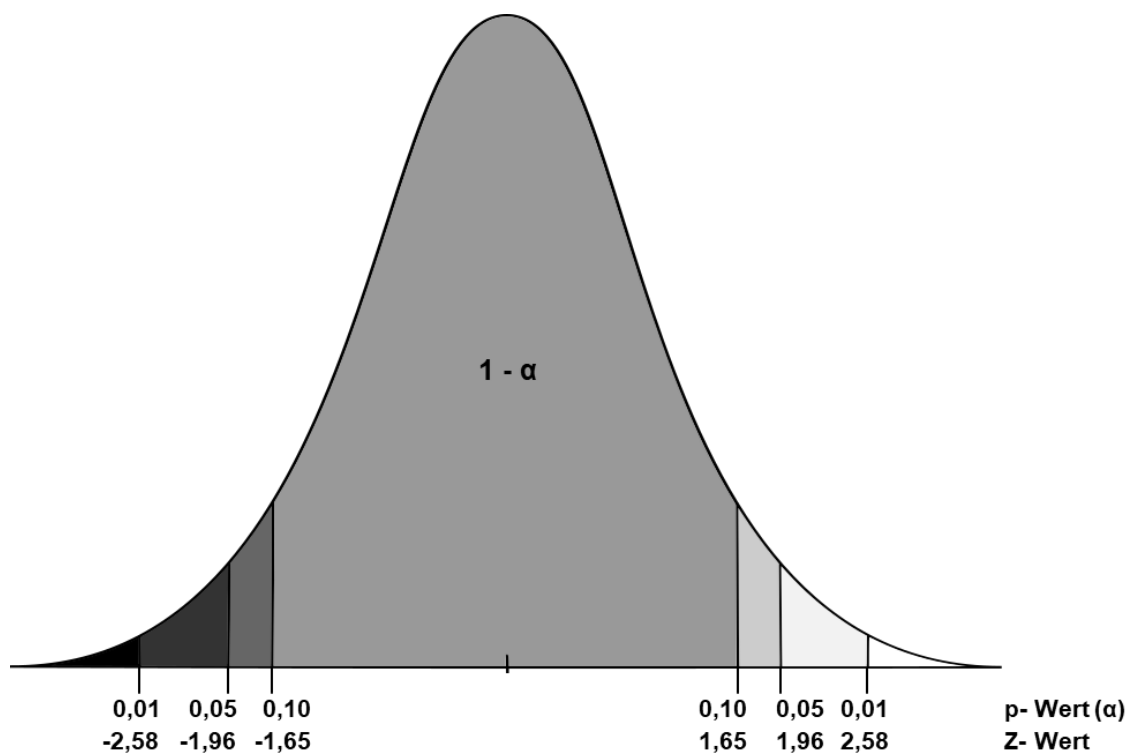


Abb. 5-1: Quantile der Standardnormalverteilung mit p- und dazugehörigen z-Werten (Quelle: BORTZ & LIENERT 2008, verändert)

Wie weit der in die Formel eingesetzte geschätzte Anteil an in den Lift einschwimmenden Fischen vom realen Wert abweichen kann, wird mittels der Angabe e (Konfidenzintervall) vorgegeben, welche die Genauigkeit der Schätzung angibt, die in der Regel zwischen 0,1 und 0,05 liegt.

Im o. g. Beispiel sollen die getesteten Fische mit einem vorgegebenen Anteil von 80 % in den Fischlift einschwimmen, um dessen Funktionsfähigkeit zu belegen. In Verbindung mit einem p- und z-Wert von 0,05 bzw. 1,96 ergibt sich aus der Formel (11) ein Stichprobenumfang von mindestens 246 Fischen, die getestet werden müssen:

$$n > 1,96^2 * \frac{0,8(1 - 0,8)}{0,05^2} \quad (12)$$

$$\Rightarrow n > 246$$

Bei einer geringeren Schätzungsgenauigkeit  $e$  von 0,1 würde sich ein Stichprobenumfang von lediglich 62 Tieren ergeben. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die möglichen Abweichungen vom zuvor geschätzten Anteil (80 % der Fische schwimmen in den Fischlift) größer sind als bei einer Schätzungsgenauigkeit  $e$  von 0,05.

Bei fehlendem Vorwissen kann für  $p$  mit 0,5 der *worst case* angenommen werden (KAUERMANN & KÜCHENHOFF 2011). Im vorliegenden Beispiel würde demnach angenommen werden, dass lediglich 50 % der getesteten Fische in den Fischlift einschwimmen. Bei einer Schätzungsgenauigkeit von  $e = 0,05$  würde sich ein Stichprobenumfang von etwa 385 Tieren ergeben, die getestet werden müssten. Bei diesem vergleichsweise geringen Anteil an in den Fischlift einschwimmenden Fischen wird ein höherer Stichprobenumfang nötig, da Anteile umso schwieriger zu identifizieren sind, je näher diese an 50 % liegen.

Werden im Freiland mit der zuvor bestimmten Anzahl an Versuchsfischen keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen, gilt, dass die Wahrscheinlichkeit des Auffindens und damit die Funktionsfähigkeit des Fischliftes geringer als der zuvor angegebene p-Wert (im Beispiel 80 % bzw. 50 %) sein muss.

## 5.2 Bestimmung des Stichprobenumfangs im Rahmen des Vergleichs zweier Gruppen (Variante II)

Im Folgenden werden zwei verschiedene Varianten zur Bestimmung des Stichprobenumfangs für den Vergleich zweier Gruppen dargestellt. Variante II.a bezieht sich auf die Bestimmung des Stichprobenumfangs mittels der frei verfügbaren Software *R*. Variante II.b beschreibt die Darstellung der Stichprobensimulation über die in der automatischen Auswertungssoftware integrierte Benutzeroberfläche (vgl. Kap. 4.3.6.3).

### Variante II.a:

Die benötigte Anzahl an Versuchstieren zur Ermittlung von Unterschieden zwischen Häufigkeiten von Ereignissen (z. B. Auffinden einer Abstiegsanlage) in Abhängigkeit von einem Parameter (z. B. der Strömungsgeschwindigkeit) mit zwei Merkmalsausprägungen (0,3 und 0,5 m/s), kann u. a. mithilfe des Softwareprogramms *R* (vgl. Anhang A.4) bestimmt werden. Dazu ist festzulegen, mit welchem Unterschied zwischen den Gruppen ein aussagekräftiger Wert repräsentiert wird.

Folgendes Beispiel soll die Ermittlung des Stichprobenumfangs verdeutlichen: Im Vorfeld des Umbaus eines veralteten, konventionellen Fischabstiegssystems (Setup 1) hin zu einem optimierten System (Setup 2) soll ermittelt werden, wie viele Fische für den experimentellen Nachweis einer Verbesserung, die einen Umbau unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten rechtfertigt, benötigt werden. Die angestrebte Auffindungsrate soll für das modifizierte Abstiegssystem mindestens 15 Prozentpunkte höher sein. Aus Monitoringuntersuchungen ist bekannt, dass etwa 70 % der Fische, die im Bereich des alten konventionellen Fischabstiegssystems nach einem Abstieg suchen, diesen auch annehmen ( $p_1$ ). Dementsprechend würde bei einer experimentell ermittelten Auffindungsrate des neuen Systems von 85 % ein Umbau durchgeführt werden ( $p_2$ ). Für die Stichprobenberechnung sind darüber hinaus der Fehler 1. Art ( $\alpha = 0,05$ ) und der Fehler 2. Art ( $\beta$ ) bzw. die sogenannte Power ( $1-\beta = 1-0,2 = 0,8$ ) anzugeben (vgl. Kap. 2.1.4.2). Der Standardwert des  $\beta$ -Fehlers wird mit 0,2 angegeben (COHEN 1988). Demnach wird mit einer 20-prozentigen Wahrscheinlichkeit ein vorliegender Effekt übersehen. Die Wahrscheinlichkeit der Detektion eines vorliegenden Effekts ( $1-\beta$ ), auch Power oder Teststärke genannt, liegt folglich bei 80 % (COHEN 1988). Auf Basis dieser Annahmen kann mittels der Software *R* nun der jeweilige Stichprobenumfang ermittelt werden, der notwendig ist, um einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Gruppen nachzuweisen. Im vorliegenden Beispiel ergibt sich eine Anzahl von mindestens 120 Versuchsfischen pro Setup (Abb. 5-2). Sofern tatsächlich ein signifikanter Unterschied zwischen den Auffindungsraten beider Gruppen besteht und er mindestens 15 Prozentpunkte (s. o.) beträgt, kann dieser mit der so ermittelten Anzahl von mindestens 120 Fischen pro Setup mit 80-prozentiger Sicherheit nachgewiesen werden. Um kleinere Unterschiede (also  $< 15\%$ ), sofern vorhanden, mit gleicher Sicherheit (also 80 %) als signifikant nachweisen zu können, müsste der Stichprobenumfang weiter erhöht werden.

```
> power.prop.test(p1=0.7, p2=0.85, sig.level=0.05, power=0.8)
```

```
Two-sample comparison of proportions power calculation
```

```
      n = 120.4719
     p1 = 0.7
     p2 = 0.85
sig.level = 0.05
  power = 0.8
alternative = two.sided
```

NOTE: n is number in \*each\* group

Abb. 5-2: Ausgabe zur Berechnung des Stichprobenumfangs zweier miteinander verglichener Gruppen mittels des Softwareprogramms *R* und des Befehls `power.prop.test`

Variante II.b:

Im Rahmen des Consulting-Projektes der LMU-München (vgl. Kap. 4.3.6.3) wurde in die automatische Auswertesoftware ein Tool zur Bestimmung des Stichprobenumfangs implementiert. Die Stichprobenplanung wurde auf der Grundlage der Daten und Anforderungen des OVeR-Projektes erstellt, ist aber generell für alle Setups anwendbar, die sich im Hinblick auf einen Parameter in zwei verschiedenen Ausprägungen (hier: Strömung: 0,3 | 0,5 m/s; Wassertemperatur: 15 °C | 20 °C; Rechenstababstand: 10 mm | 20 mm) unterscheiden.

Der Ansatz geht von zwei zu wählenden Wahrscheinlichkeiten aus, mit welchen ein Fisch bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,3 bzw. 0,5 m/s im Bypasseingang den Bypass findet. Die Bestimmung des Stichprobenumfangs erfolgt wie in Variante II.a über eine empirische Schätzung mit der Software *R*. Auf iterativem Weg wird die Anzahl benötigter Probanden so lange simuliert, bis signifikante Unterschiede zwischen den beiden Wahrscheinlichkeiten konstatiert werden. Die Anwendung gibt das Ergebnis der Stichprobensimulation in Form eines Graphen sowie die Anzahl an insgesamt zu testenden Tieren wieder (Abb. 5-4). Anders als bei der Variante II.a wird hierbei nicht die Anzahl an Tieren pro Setup, sondern die Gesamtzahl ausgegeben, die demnach noch durch zwei geteilt werden muss.

In der automatischen Anwendung lassen sich für die jeweiligen Setups bestimmte Häufigkeiten einstellen. Im vorliegenden Beispiel sind dies 0,7 (70%) und 0,85 (85 %) (Abb. 5-3a). Dementsprechend unterscheiden sich beide Setups in 15 Prozentpunkten. Daneben kann die Power bzw. Teststärke angegeben werden; diese liegt in der Voreinstellung beim Standardwert von 0,8 (vgl. KAUERMANN & KÜCHENHOFF 2011, Abb. 5-3b). Die Irrtumswahrscheinlichkeit bzw. das Signifikanzniveau (Fehler 1. Art, Alternativhypothese wird angenommen, obwohl sie falsch ist) ist in der Anwendung mit 5 % festgelegt. Es ist allerdings möglich, das Signifikanzniveau bei Bedarf im *R*-Skript anzupassen. Auch die Anzahl an Iterationen kann manuell eingegeben werden (Abb. 5-3c). Umso höher die Anzahl an Wiederholungen, desto geringer ist die Varianz des Schätzwertes und umso valider ist die Anzahl an Stichproben. Ein geringfügiger Nachteil einer erhöhten Anzahl an Wiederholungen ist lediglich eine längere Simulationszeit des Computers zur Berechnung der Stichprobenzahl.

a) **Wahrscheinlichkeit, das Ziel zu finden**

0.01 0.7 0.85 1

0.01 0.11 0.21 0.31 0.41 0.51 0.61 0.71 0.81 0.91 1

b)  **$1 - \beta$  Fehler (Empfehlung bei 0.8)**

0.01 0.8 1

0.01 0.11 0.21 0.31 0.41 0.51 0.61 0.71 0.81 0.91 1

c) **Anzahl an Wiederholungen**

100

Abb. 5-3: Auswahlmöglichkeiten zur Bestimmung des Stichprobenumfangs in der im Rahmen des OVeR-Projektes entwickelten automatischen Auswertungsanwendung; a) Festlegung der Häufigkeiten der Ereignisse, b) Festlegung der Teststärke ( $1-\beta$ ), c) Angabe der Wiederholungen für die Schätzung des Stichprobenumfangs

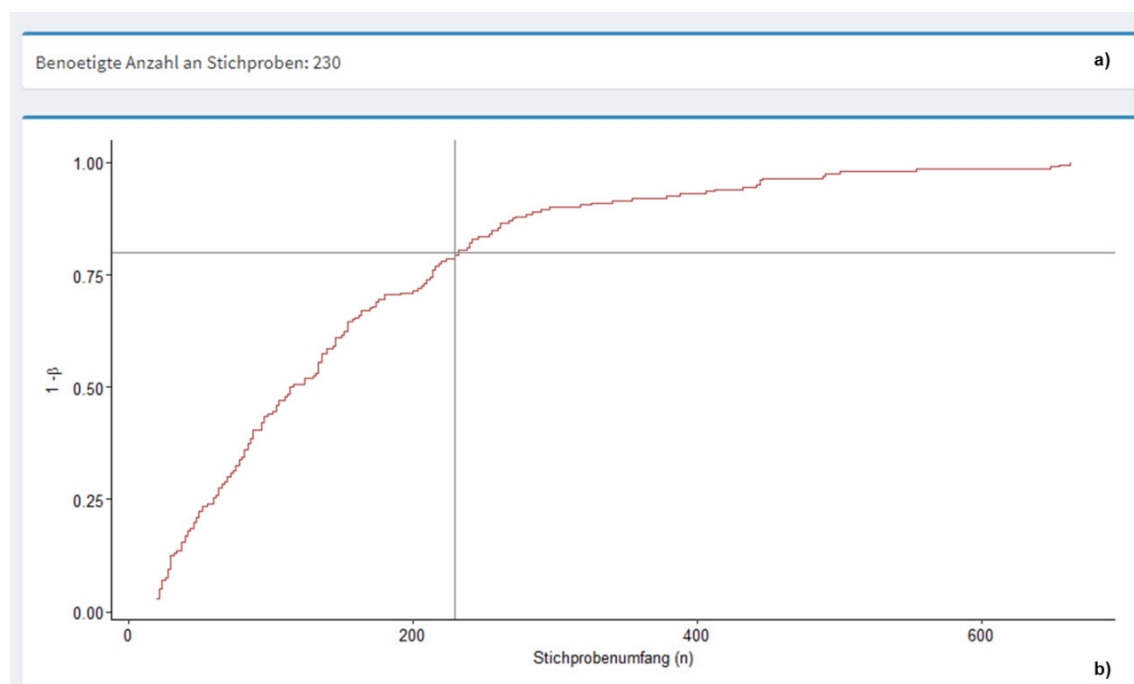


Abb. 5-4: a) Angabe des Stichprobenumfangs (gesamt) und b) Graph des Stichprobenumfangs in Abhängigkeit vom Fehler 2. Art, ermittelt über die im Rahmen des OVeR-Projektes entwickelte automatische Auswertungsanwendung

## 6 Digitaler Verfahrenskatalog (diVe) für ethohydraulische Untersuchungen

Das Ergebnis der vorliegenden Forschungsarbeit ist ein Verfahrenskatalog für ethohydraulische Untersuchungen, der die benötigten Grundlagen und Erkenntnisse bündelt und als digitale Version zur Nutzung bereitstellt. Die angesprochene Nutzergruppe sind Durchführende von ethohydraulischen Tests. Die digitale Anwendung beinhaltet Vorgaben und nützliche Informationen, die für eine standardisierte Vorgehensweise während der ethohydraulischen Tests und der späteren Datenauswertung zu berücksichtigen sind.

Der **digitale Verfahrenskatalog (diVe)** wurde mittels der frei verfügbaren Programmiersprache *R* (R CORE TEAM 2017) in Verbindung mit dem Paket *shiny* (CHANG et al. 2017), das eine intuitiv verwendbare Benutzeroberfläche integriert, entwickelt. Die Anwendung wurde als sogenanntes Stand-Alone-Programm umgesetzt, wodurch seine Verwendung im Browser auch ohne die Installation besonderer Software möglich ist.

Die Inhalte und Anordnung der Sidebar-Themen (Tabs) in diVe spiegeln die Kapitelstruktur der vorliegenden Arbeit wider:

Auf der Startseite findet sich eine kurze Einführung zu Zweck, Zielgruppe und Inhalt der Anwendung.

Im zweiten Tab lässt sich eine Checkliste herunterladen, die als Praxis-Tool zur Qualitätssicherung während der Planung und Durchführung von Untersuchungen in Wasserbaulaboren eingesetzt werden kann (s. Anhang A.5, Abb. 6-1).

Weiter informiert die Anwendung über fischphysiologische Hintergründe (Sinnesorgane der Fische), die bei den Untersuchungen zu bedenken sind, um Beobachtereffekte und Artefakte auszuschließen bzw. möglichst gering zu halten (vgl. Kap. 2.2.3, Abb. 6-2).

Die weiteren Tabs greifen die in Kap. 4 ausführlich beschriebenen Grundlagen und Erkenntnisse auf. Abrufbar sind hier Informationen über bauliche, verhaltensbiologische, chemisch-physikalische und tierschutzrechtliche Grundlagen. Es finden sich Praxis-Hinweise, beispielsweise zu den Motivationszeiträumen verschiedener Fischarten, in übersichtlicher Form.

Im nachfolgenden Tab wird auf den Zweck und Inhalt von Vorversuchen hingewiesen.

Für die Hauptversuche erfolgt eine stichpunktartige Beschreibung der Vorgehensweise. Hier finden sich praktische Handlungsanleitungen, beispielsweise für den Versuchsablauf ethohydraulischer Untersuchungen oder das Flussdiagramm zur Auswahl des statistischen Tests bei der Datenauswertung.

Zudem ist in der Anwendung ein Modul zur automatischen Berechnung von Stichprobenumfängen integriert, wobei verschiedene Parameter individuell an spezifische Untersuchungsbedingungen angepasst werden können. Damit wird eine praktische Hilfe zur Bestimmung der benötigten Anzahl an Versuchstieren gegeben (Stichprobenpla-

nung). Hierbei werden die in Kapitel 5 beschriebenen Varianten zur Berechnung der Stichprobengröße aufgegriffen und ihre Anwendung ermöglicht.

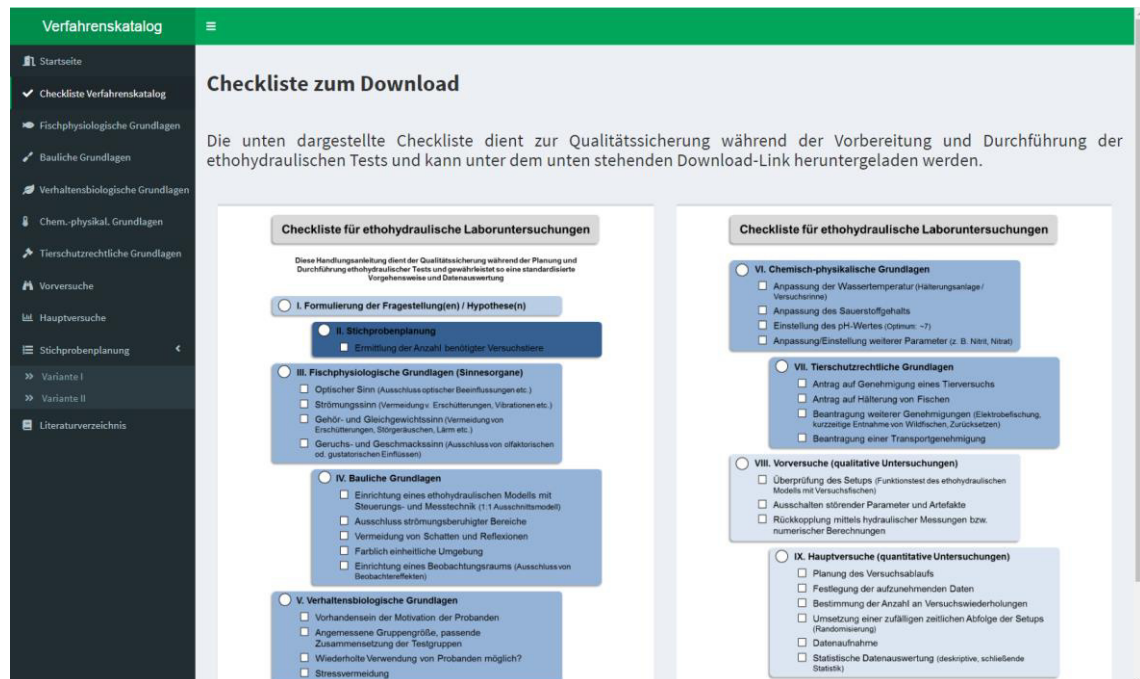


Abb. 6-1: Benutzeroberfläche des digitalen Verfahrenskataloges, Ausschnitt aus den Inhalten des Tabs „Checkliste Verfahrenskatalog“

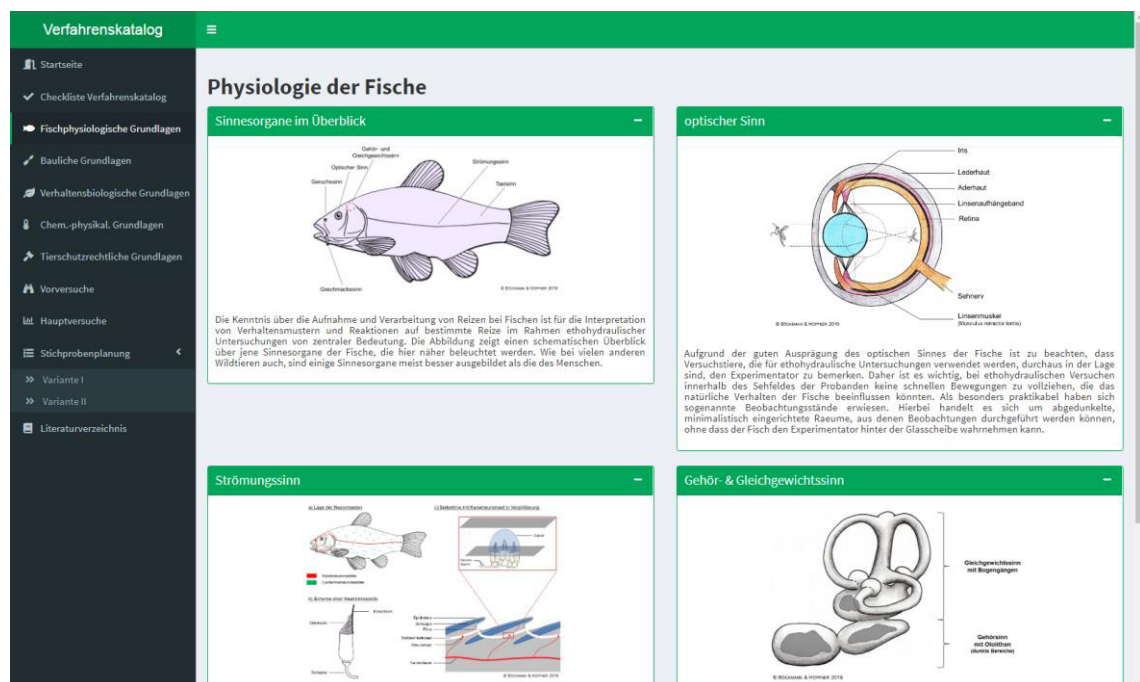


Abb. 6-2: Benutzeroberfläche des digitalen Verfahrenskataloges, Ausschnitt aus den Inhalten des Tabs „Fischphysiologische Grundlagen“



## 7 Zusammenfassung und Fazit

Mithilfe der Ethohydraulik ist es möglich, unter kontrollierten Laborbedingungen das Verhalten von Fischen bei bestimmten strömungsphysikalischen Bedingungen zu beobachten und daraus Erkenntnisse zu generieren, die eine Anwendung in der wasserbaulichen Praxis finden können (ADAM & LEHMANN 2011). Dabei steht die Beschreibung und Bewertung der Fischverhaltensreaktionen auf die hydraulischen Reize auf qualitativer Ebene im Vordergrund (LEHMANN et al. 2009). Diese Methode hat in Bezug auf die Gestaltung und Bemessung von Anlagen zur Wiederherstellung der Gewässerdurchgängigkeit zahlreiche zielführende Erkenntnisse erbracht (MUNLV NRW 2005, DWA 2014). Bislang folgte der Ansatz hinsichtlich der Datenaufnahme und der späteren statistischen Auswertung von ethohydraulisch zählbaren Ereignissen keiner allgemeingültigen, standardisierten Vorgehensweise, was jedoch aktuell von verschiedenen Seiten als zukunftsorientierte Perspektive gefordert wird (WEY et al. 2016, WEICHERT et al. 2016, SCHÜTZ & HENNING 2017, EBEL 2017, NAUMANN et al. 2018).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden daher verschiedene Grundlagen und Erkenntnisse aus eigenen Projekten und der Literatur in einem sogenannten Verfahrenskatalog zusammengestellt, die der Qualitätssicherung während der Planung und Durchführung ethohydraulischer Tests dienen sollen. Neben einer standardisierten Bewertung reizinduzierter Fischreaktionen ermöglicht die Anwendung der Kataloginhalte eine Auswertung von ethohydraulisch zählbaren Ereignissen mittels schließender Statistik, was eine hohe Belastbarkeit der Ergebnisse sichert. Insgesamt gewährleistet dies den zur Maßnahmenumsetzung Verpflichteten ein hohes Maß an Planungssicherheit.

In der Konsequenz bedeutet dies, dass nach dem vorgegebenen Muster durchgeführte Untersuchungen und daraus resultierende Ergebnisse mit einem bestimmten Sicherheitsmaß eine hohe Reproduzierbarkeit aufweisen. Dieses Sicherheitsmaß spiegelt einen Vertrauensbereich (Konfidenzintervall) wider, der wiederum eine für Dritte nachvollziehbare Bewertung des Testobjektes ermöglicht oder dessen Funktionalität ablehnt. Wesentlich für die abschließende Gesamtbewertung ist dabei, dass neben dem aus der Literatur bekannten Forschungsstand auch fachwissenschaftliche Expertise notwendig ist, diese sich jedoch an statistisch nachvollziehbaren Grundlagen orientieren muss.

Zur Erarbeitung der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Grundlagen wurden die im Folgenden beschriebenen Forschungsgegenstände bearbeitet.

### **Forschungsgegenstand I:**

Erarbeitung eines Verfahrenskataloges zur standardisierten Vorgehensweise bei ethohydraulischen Untersuchungen und Implementierung einer statistischen Auswertungsmethodik zählbarer ethohydraulischer Ereignisse.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahrenskatalog erarbeitet, der als Grundlage für einen Labor-Standard zur Durchführung und statistischen Auswertung ethohydraulischer Untersuchungen dient. Dazu wurden verschiedene Grundlagen und Erkenntnisse aus eigenen Untersuchungen und der vorhandenen Literatur herangezogen, die bei der Planung und Durchführung von Labortests zu berücksichtigen sind. Hierbei handelt es sich beispielsweise um bauliche, verhaltensbiologische und chemisch-physikalische Grundlagen.

Bei Anwendung der aufgeführten Aspekte können u. a. Artefakte frühzeitig erkannt und eliminiert werden, wodurch Fehlinterpretationen ausgeschlossen werden und die Versuchsergebnisse deutlich an Aussagekraft gewinnen. Von besonderer Bedeutung ist hier die vorgeschaltete Kalibrierung des Versuchs-Setups im Rahmen von Vorversuchen, so dass Verhaltensreaktionen der Fische in den Hauptversuchen auf den zu untersuchenden Parameter (z. B. Strömungsgeschwindigkeit) zurückgeführt werden können.

Für die Hauptversuche, in deren Rahmen die entsprechende Parametervalidierung stattfindet, werden wichtige Aspekte in Bezug auf die praktische Versuchsdurchführung (wie z. B. standardisierter Versuchsablauf, Versuchswiederholungen, Randomisierung, Verwendung digitaler Datenaufnahmebögen etc.) sowie die statistische Datenauswertung dargestellt.

Für die Erarbeitung des Verfahrenskataloges diente die methodische Vorgehensweise und spätere Datenauswertung des FuE-Projekts OVeR als Pilot-Untersuchung (vgl. Kap. 3.4). Hier wurden erstmalig explizit sämtliche für eine valide statistische Auswertung erforderlichen Grundlagen berücksichtigt. Bei der Planung der in Modul II des OVeR-Projektes durchgeführten ethohydraulischen Tests wurden die in der vorliegenden Arbeit dargestellten Grundlagen zum wissenschaftlichen Arbeiten sowie der Fisch-Physiologie (vgl. Kap. 2) und Erkenntnisse aus verschiedenen ethohydraulischen Untersuchungen (vgl. Kap. 3) angewendet. Basierend auf dem Datensatz des OVeR-Projekts wurde außerdem eine Software entwickelt, die eine automatisierte statistische Auswertung von ethohydraulisch zählbaren Ereignissen ermöglicht. Mithilfe einer in der Software enthaltenen Statistikanwendung kann u. a. schnell und komfortabel überprüft werden, ob sich ein bestimmtes beobachtetes Verhalten bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen tatsächlich (d. h. statistisch signifikant belegbar) hinsichtlich des getesteten Parameters unterscheidet oder nicht.

Wird der im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit erarbeitete Verfahrenskatalog bei der Durchführung ethohydraulischer Laboruntersuchungen angewendet, können neben der Bewertung reizinduzierter Reaktionen von Fischen also auch statistisch validierte Aussagen zu Ausschnittsmodellen im Labor getroffen werden. Auf Grundlage von Laborergebnissen, die mittels schließender Statistik abgesichert wurden, können Bewertungen und Prognosen zur Funktionalität des Untersuchungsgegenstandes getroffen werden, die schließlich im Rahmen von Freilanduntersuchungen verifiziert werden müssen. Obwohl Untersuchungen an Prototypen im Freiland weiterhin unabdingbar bleiben, können diese jedoch besser geplant und damit effizienter gestaltet werden, wenn die vorhergehenden ethohydraulischen Versuche den hier erarbeiteten Empfehlungen

folgen. Umso detaillierter letztlich auf quantitativer Ebene im Labor gearbeitet wird, desto besser können die Erkenntnisse im Rahmen der Transferphase auf das multifunktionale System „Freiland“ übertragen werden. Dies ist vor dem Hintergrund der in der Regel sehr kostenintensiven Untersuchungen im Freiland von Vorteil.

### **Forschungsgegenstand II:**

Erarbeitung einer Stichprobenplanung zur frühzeitigen und zuverlässigen Bestimmung der Anzahl an benötigten Versuchstieren.

Die Bearbeitung dieses Forschungsgegenstandes erfolgte vor dem Hintergrund tierschutzrechtlicher Randbedingungen. Im Rahmen eines Tierversuchsantrages muss im Vorfeld von ethohydraulischen Untersuchungen die Anzahl benötigter Versuchsfische begründet dargelegt werden. So wird vor dem Hintergrund ethischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte berücksichtigt, dass so wenig Tiere wie möglich, aber so viele wie für statistisch aussagekräftige Ergebnisse nötig, für die Untersuchungen verwendet werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei verschiedene Varianten zur Bestimmung des Stichprobenumfangs für ethohydraulische Untersuchungen erarbeitet. Bei beiden Varianten bilden Häufigkeiten zählbarer Ereignisse die Grundlage für die Ermittlung des Stichprobenumfangs:

- Variante I bietet die Möglichkeit, den Stichprobenumfang zu ermitteln, der nötig ist, um eine zuvor festgelegte Häufigkeit eines bestimmten Ereignisses statistisch nachweisen zu können (Kap. 5.1). Dies ermöglicht beispielsweise den Nachweis der Funktionsfähigkeit eines bestimmten Fischabstiegssystems bzw. dessen Untauglichkeit.
- Bei Variante II wird der Stichprobenumfang ermittelt, der erforderlich ist, um vermutete Unterschiede zwischen zwei Gruppen von Versuchsfischen nachweisen zu können, abhängig von einem bestimmten Parameter, wie z. B. der Strömungsgeschwindigkeit (Kap. 5.2).

Die im Rahmen der Stichprobenplanung ermittelte Anzahl an Versuchstieren sichert auf der einen Seite zu, dass die Anzahl getesteter Tiere ausreichend ist, um vorhandene signifikante Effekte mit hoher Sicherheit nachzuweisen. Auf der anderen Seite kann bei fehlenden Signifikanzen aber auch eine zu geringe Stichprobengröße als Ursache ausgeschlossen werden, so dass eine zeit- und kostenaufwendige Versuchswiederholung mit größeren Stichproben unnötig ist. Um jedoch eine solide Basis für dieses Verfahren zu schaffen, sind im Vorfeld der Berechnungen eine fundierte Definition von Erwartungen und Schwellenwertfestlegungen erforderlich, welche aus der Forschungsfrage abgeleitet werden und alle relevanten Parameter berücksichtigen müssen. Dabei muss stets die zentrale Frage sein, in welcher Größenordnung die gesuchten Effekte für die Praxis relevant sind. Bei zu strengen Schätzungen kann es ansonsten zu einer unnötig hohen Zahl an Versuchstieren

kommen (STAHEL 2016, AMRHEIN et al. 2017), während zu grobe Schätzungen die Wahrscheinlichkeit erhöhen, vorhandene Effekte nicht nachweisen zu können.

Die Ergebnisse beider Forschungsgegenstände wurden abschließend in einer digitalen Anwendung gebündelt, die Durchführenden ethohydraulischer Studien als Handlungsanleitung zur Verfügung gestellt werden kann.

Der entwickelte Verfahrenskatalog leistet einen Beitrag zur Steigerung der Effizienz ethohydraulischer Untersuchungen und verbessert die Qualität der wissenschaftlichen Erkenntnisse. Letztlich kann so die Wirtschaftlichkeit von Forschungsprojekten entscheidend gesteigert und ein hohes Maß an Planungssicherheit gewährleistet werden.

## 8 Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf

### 8.1 Freilandvalidierung

Der in der vorliegenden Arbeit entwickelte Verfahrenskatalog ermöglicht den frühzeitigen Ausschluss versuchsbedingter Artefakte im Rahmen ethohydraulischer Untersuchungen. So können parameterbezogene Ergebnisse gewonnen werden, die eine statistisch abgesicherte Funktionalität der Technik mit einem hohen Maß an Allgemeingültigkeit gewährleisten. Da im ethohydraulischen Laborversuch, u. a. aus Platzgründen, die Wassertiefen und Fließquerschnitte kleinskaliger als bei vielen Anlagen im Freiland ausgeführt werden, müssen die Laborbefunde, die anhand einer 1:1-Struktur innerhalb der kleinskaligen Laborumgebung gewonnen werden, in einem weiteren Schritt im Freiland validiert werden. In Bezug auf die Freilandvalidierung bestehen jedoch noch methodische Wissensdefizite. Bisher gibt es nur sehr wenige Untersuchungen, die alle drei Phasen der Ethohydraulik, inklusive der Transferphase mit Freilandvalidierung, durchlaufen (LEHMANN et al. 2009).

Im Rahmen eines Forschungsprojektes sollte immer auch die Berücksichtigung der Grenzen ethohydraulischer Untersuchungen bei der Übertragung der Laborbefunde auf das Freiland erfolgen. So beruhen die Erkenntnisse aus Laborstudien in erster Linie auf maßstäblich getesteten Untersuchungsparametern, die jedoch bei der Übertragung auf die reale, multifaktorielle Freilandsituation durch viele weitere Parameter beeinflusst bzw. überdeckt werden können. Zudem unterscheiden sich die räumlichen Abmessungen im Freiland in der Regel deutlich von der Laborsituation. Daher ist ein Folgeschritt notwendig, in dem geprüft wird, wie die situative Ähnlichkeit als auch die Befunde bewertet und ggf. angepasst werden können.

Hinsichtlich der methodischen Wissensdefizite in der Freilandvalidierung haben verschiedene eigene ethohydraulische Freilanduntersuchungen gezeigt, dass hier insbesondere die großräumige Situation berücksichtigt werden muss (vgl. BUGEFI et al. 2017, BUGEFI 2017). Konkret führt die Großräumigkeit häufig zu Schwierigkeiten beim Auffinden der getesteten baulichen Strukturen durch die Fische. So muss beispielsweise bei Versuchen zum Fischabstieg anhand von Voruntersuchungen eruiert werden, ob Fische ggf. durch gezielte Leitmaßnahmen (z. B. Turbinenmanagement, Wehrmanagement etc.) zu den Teststrukturen geführt werden müssen bzw. können und ob bzw. an welchen Stellen in diesem Rahmen „Abholpunkte“ für Fische sinnvoll sind.

Zusammenfassend lässt sich schließen, dass im Rahmen der Freilandvalidierung ein Link zwischen den kleinräumigen Teststrukturen der Laborsituation und der großräumigen multifaktoriellen Freilandsituation geschaffen werden muss.

## 8.2 Vervollständigung des Verfahrenskataloges

Der in der vorliegenden Arbeit erarbeitete Verfahrenskatalog erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sollte fortlaufend unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus weiteren ethohydraulischen Untersuchungen ergänzt und weiterentwickelt werden.

Viele Parameter konnten noch keine Berücksichtigung finden: Beispielsweise ist noch unklar, inwiefern die - im Freiland häufig intensive - Wassertrübung das Verhalten von Fischen beeinflusst. Für Zander (*Sander lucioperca* L.) ist beispielsweise bekannt, dass diese bei hoher Wassertrübung auch tagsüber auf Beutejagd gehen (KESKINEN & MARJOMAKI 2003, RANÄKER et al. 2014). Inwiefern die Trübung des Wassers einen Einfluss auf die Aktivität dieser Fischart in ethohydraulischen Tests hat, ist nicht geklärt. Um diesen Parameter in Labortests zu berücksichtigen, muss jedoch eine Alternative zur konventionellen visuellen Verhaltensbeobachtung gefunden werden, da eine Wassertrübung diese Methode erheblich erschwert bzw. unmöglich macht. Eine Möglichkeit wäre hier die Beobachtung mittels Sonaren (vgl. Kap. 2.2.2).

Auch die Bedeutung des circadianen Rhythmus<sup>1</sup> der Versuchsfische wurde bisher nicht quantitativ berücksichtigt. Im Rahmen des Baldeney-Projekts sowie des Moduls I im OVeR-Projekt wurden Nachtuntersuchungen mit Lachsen, Flussbarschen und Rotaugen durchgeführt, dabei konnte auf qualitativer Ebene kein Hinweis auf divergentes Verhalten der Probanden in Bezug auf die Tageszeit gefunden werden. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass tag- und nachtaktive Fischarten bei Labortests unterschiedliche Verhaltensweisen zeigen. So konnten z. B. HELFMAN (1986) und ZHDANOVA & REEBS (2006) einen Einfluss von Tag, Nacht und Dämmerung auf das Verhalten von Fischen in ihrem natürlichen Lebensraum nachweisen. Auch eigene Freilanduntersuchungen weisen auf tageszeitlich bedingte Wanderungen hin (BUGEF 2017). Dass der Parameter „Tageszeit“ einen Effekt auf das Verhalten der Fische hat, ist unumstritten - inwiefern bei Nichtbeachtung jedoch auch atypisches Verhalten im Labor gezeigt und damit Ergebnisse verfälscht werden, ist bislang nicht geklärt. Um Aussagen über den Einfluss der circadianen Aktivität von Fischen bei ethohydraulischen Untersuchungen treffen zu können, sind unbedingt quantitative Untersuchungen notwendig. Hierbei ist zu prüfen, ob sich das Verhalten von Fischen im Tagesverlauf unterscheidet. Um die Untersuchungen bei Nacht durchführen zu können, wäre die Versuchsrinne mit Infrarotlicht (IR) auszustatten. Da aber auch ein Einfluss von IR auf das Verhalten der Tiere nicht ausgeschlossen werden kann (vgl. Kap. 2.2.3), sollte auch hier in Erwägung gezogen werden, die visuelle Beobachtung durch Echoortung zu ersetzen.

Der Einfluss von Sohlrauigkeit auf das Verhalten von Fischen in Laborstudien fand bisher ebenfalls keine Berücksichtigung. Auch hierbei sind quantitative Untersuchungen notwendig, um zu prüfen, ob sich das Verhalten der Probanden im Labor hinsichtlich verschiedener Rauigkeiten (natürliches Sohlsubstrat mit Steinen, Kies etc. vs. Betonsohle) unterscheidet. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die Sohle keinen zusätzlichen Parameter darstellen darf, der den eigentlich zu beobachtenden Untersuchungsparameter überdeckt, indem die Fische sich evtl. in der Sohle verbergen und so keine Ergebnisse produziert werden können.

Ein weiterer Faktor, der insbesondere bei Auf- und Abstiegswanderungen von Langdistanzwanderfischen eine Rolle spielt, ist die geomagnetische Orientierung (DURIF et al. 2013, NAISBETT-JONES et al. 2017, SCANLAN et al. 2018). Für die Fischarten Lachs und Aal beispielsweise ist die Auffindbarkeit ihrer Laichhabitats eng mit der Wahrnehmung des Erdmagnetfeldes verknüpft. Wie in Kapitel 4.1.2.1 beschrieben, haben insbesondere die Ergebnisse aus Abstiegsuntersuchungen mit Aalen gezeigt, dass die Motivation der Tiere eher gering war. Hier ist zu berücksichtigen, dass beispielsweise auch starke künstliche Magnetfelder im Labor die natürliche Richtungspräferenz der Aale verändern können (vgl. GINNEKEN et al. 2005). So konnten BRANOVER et al. (1971) nachweisen, dass die Aktivität von Aalen in einem magnetischen Feld deutlich erhöht war. Es ist denkbar, dass die Ausrichtung der ethohydraulischen Versuchsrinne in den Wasserbaulaboren auch einen Einfluss auf das natürliche Abwanderverhalten von Aalen haben kann, auch ist es möglich, dass künstliche Magnetfelder das natürliche Erdmagnetfeld überlagern. Möglicherweise kann der Einsatz von künstlichen geographischen Magnetfeldern in Laborstudien die Abwanderung von Blankaalen induzieren und damit die Aktivität während der Tests erhöhen.

### **8.3 Perspektive**

Ziel zukünftiger Bemühungen muss es sein, zum einen die aufgeführten Wissenslücken in der Laborarbeit zu schließen und zum anderen eine standardisierte Methodik zur Freilandvalidierung in Form einer Handlungsanleitung, analog zu dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten Verfahrenskatalog, zu erarbeiten.

Bei ethohydraulischen Forschungsprojekten ist neben einer engen Zusammenarbeit zwischen Biologen und Ingenieuren (Wasserbautechnik, Numerik), auch ein Austausch mit anderen Fachdisziplinen, wie z. B. der Statistik oder Informatik, unerlässlich.

## Literaturverzeichnis

- ABDELAZIZ, S. (2013): Numerical simulation of fish behavior and fish movement through passages. Dissertation. TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 142 S.
- ADAM, B., LEHMANN, B. (2011): Ethohydraulik - Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 355 S.
- ADAM, B., SCHÜRMANN, M., SCHWEVERS, U. GISCHKAT, S., SCHRECKENBACH, K. (2013): Zum Umgang mit aquatischen Organismen – Versuchstierkundliche Grundlagen. Springer-Verlag, Wiesbaden, 190 S.
- AMRHEIN, V., KORNER-NIEVERGELT, F., ROTH, T. (2017): The earth is flat ( $p > 0.05$ ): significance thresholds and the crisis of unreplicable research. In: PeerJ 5, S. 1–40.
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W., WEIBER, R. (2008): Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 13. Aufl., 583 S.
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W., WEIBER, R. (2016): Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer-Gabler, Berlin - Heidelberg, 14. Aufl., 647 S.
- BÄRLOCHER, F. (1999): Biostatistik – Praktische Einführung in Konzepte und Methoden. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 206 S.
- BAUR, W., BRÄUER, G., RAPP, J. (2010): Nutzfische und Krebse: Lebensraum, Erkrankungen und Therapie. Enke Verlag, Stuttgart, 3. Aufl., 244 S.
- BAW (2018): Fische wandern im Modell – Wasserbau im Binnenbereich. In: BAW Aktuell - Das Infomagazin der Bundesanstalt für Wasserbau (1), S. 7–10.
- BEATTY, J. (2012): Toward a Lawful History of Life. In: Science 337 (6097), S. 912–913.
- BEHNKE, J. (2015): Logistische Regressionsanalyse: Eine Einführung. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 133 S.
- BERGER, C. (2018): Rechenverluste und Auslegung von (elektrifizierten) Schräggleichen anhand ethohydraulischer Studien. Dissertation. TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT, 251 S.
- BILOTTA, G., SIBLEY, P., HARELEY, J., DON, A. (2011): The decline of the European eel *Anguilla anguilla*: quantifying and managing escapement to support conservation. In: Journal of Fish Biology 78, S. 23–38.



- BLECKMANN, H., MOGDANS, J., ENGELMANN, J., KRÖTHER, S., HANKE, W. (2004): Wie Fische Wasser fühlen: Das Seitenliniensystem. In: *Biologie in unserer Zeit* 34 (6), S. 358–365.
- BLECKMANN, H., ZELICK, R. (2009): Lateral line system of fish. In: *Integrative zoology* 4 (1), S. 13–25.
- BLOSSFELD, H.-P. (2010): Survival- und Ereignisanalyse. In: WOLF, C., BEST, H., Hrsg., *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse*. VS Verlag, Wiesbaden, S. 995–1016.
- BMUB & UBA - BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT & UMWELTBUNDESAMT (2016): Die Wasserrahmenrichtlinie - Deutschlands Gewässer 2015, Bonn, Dessau, 148 S.
- BÖCKMANN, I., LEHMANN, B., HOFFMANN, A., KÜHLMANN, M. (2013): Fischabstieg: Verhaltensbeobachtungen vor Wanderbarrieren. In: *Wasser und Abfall* 6, S. 14–20.
- BÖCKMANN, I., HOFFMANN, A., LEHMANN, B., KÜHLMANN, M., OBERLE, P., GRAF-MÜLLER, T., SCHULTZ, P. (2015): Schaffung der Fisch-Durchgängigkeit am Ruhr-Wehr Baldeney, Essen – Abschlussbericht. Im Auftrag des Ruhrverbandes, anteilig gefördert vom Land NRW. Unveröffentlicht.
- BÖCKMANN, I., KLOPRIES, E.-M., SCHÜTTRUPF, H., HOFFMANN, A., WILMINK, A., FESTER, F., PUMMER, E., BRÜLL, C., HUDJETZ, S. (2018a): Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechenanlagen an Wasserkraftanlagen – Endbericht. Im Auftrag der innogy SE, anteilig gefördert vom Land NRW. Unveröffentlicht.
- BÖCKMANN, I., HOFFMANN, A., FESTER, F., KLOPRIES, E.-M., WILMINK, A., HUDJETZ, S., BRÜLL, C., PUMMER, E., SCHÜTTRUPF, H. (2018b): Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechenanlagen an Wasserkraftanlagen. Hier: Bypass-Systeme – Zwischenbericht 3. Im Auftrag der innogy SE, anteilig gefördert vom Land NRW. Unveröffentlicht.
- BONE, Q., MARSHALL, N. B. (1985): *Biologie der Fische*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 236 S.
- BONE, Q., MOORE, R. (2008): *Biology of Fishes*. Taylor & Francis, Hoboken, 3. Aufl., 497 S.
- BORCHERDING, J., BAUERFELD, M., HINTZEN, D., NEUMANN, D. (2002): Lateral migrations of fishes between floodplain lakes and their drainage channels at the Lower Rhine: diel and seasonal aspects. In: *Journal of Fish Biology* 61 (5), S. 1154–1170.

- BORG, B., BORNESTAF, C., HELLQVIST, A., SCHMITZ, M., MAYER, I. (2004): Mechanisms in the photoperiodic control of reproduction in the stickleback. In: Behaviour 141, S. 1521–1530.
- BORTZ, J., LIENERT, G. (2008): Kurzgefasste Statistik für die Klinische Forschung – Leitfaden für die verteilungsfreie Analyse kleiner Stichproben. Springer-Medizin-Verlag, Heidelberg, 3. Aufl., 458 S.
- BRANOVER, G., VASIL'YEV, A., GLEYZER, S., TSINOBER, A. (1971): A Study of the Behavior of the Eel in Natural and Artificial and Magnetic Fields and an Analysis of Its Reception Mechanism. In: Journal of ichthyology, a journal of original papers on all aspects of ichthyology and fisheries biology 11, S. 608–614.
- BRUIJS, M. C. M., POLMAN, H., VAN AERSSSEN, G., HADDERING, R., WINTER, H., DEERENBERG, C., SCHWEVERS, U., ADAM, B., DUMONT, U., KESSELS, N. (2003): Management of silver eel: human impact on downstream migrating silver eel in the river Meuse – Impact assessment of hydroelectric power stations and commercial eel fisheries on the eel population in the river Meuse. Final Report Contract Q5RS-2000-31141, 106 S.
- BRUIJS, M., DURIF, C. (2009): Silver Eel Migration and Behaviour – Chapter 4. In: Fish & Fisheries Series (30), S. 65–95.
- BUGEFI - BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG, GEWÄSSERMANAGEMENT UND FISCHEREI (2010): Entwicklung von Schutzmaßnahmen für Jung- und Kleinfische im Turbinenzuleitungskanal hinter dem Rechen – Abschlussbericht zu den Freilanduntersuchungen des Projektes. Im Auftrag des MUNLV NRW. Bearbeitet von BUGeFi, Planungsbüro Lehmhaus, M. Kühlmann, LFV Westfalen & Lippe e. V., M. Jesse. Unveröffentlicht.
- BUGEFI - BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG, GEWÄSSERMANAGEMENT UND FISCHEREI (2014): Aalschutz an Werra und Weser - Stellungnahme zur Effizienz von Maßnahmen zum Fischabstieg an der WKA Letzter Heller. Im Auftrag der Statkraft Markets GmbH. Unveröffentlicht.
- BUGEFI - BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG, GEWÄSSERMANAGEMENT UND FISCHEREI (2017): Fischabstieg unter besonderer Berücksichtigung des Aals am Kraftwerk Letzter Heller / Werrawerk. Im Auftrag der Statkraft Markets GmbH. Unveröffentlicht.
- BUGEFI & KIT - BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG, GEWÄSSERMANAGEMENT UND FISCHEREI & KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (2016): Ethohydraulische Untersuchungen zum Fischabstieg über den Hydro-Fischlift – Abschlussbericht. Im Auftrag des Ruhrverbands sowie der RWE Innogy GmbH. Unveröffentlicht.
- BUGEFI ET AL. - BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG, GEWÄSSERMANAGEMENT UND FISCHEREI (BUGeFi); PLANUNGSBÜRO KOENZEN - WASSER UND LANDSCHAFT;

- UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN, ABTEILUNG WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT; VERTUM GMBH, KRAFTWERKTECHNIK; LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN (2012): Ableitung von gewässertemperaturspezifischen Temperaturanforderungen, Prüfung von wärmerelevanten Einleitungen und möglicher Verbesserungspotenziale nach Stand der Technik, sowie Erarbeitung einer Vorgehensweise für die einzugsgebietsweite Bewirtschaftung der Gewässer bezogen auf den Temperaturhaushalt. Im Auftrag des MKULNV NRW.
- BUGEFI ET AL. - BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG, GEWÄSSERMANAGEMENT UND FISCHEREI (BUGEFI), LFV HYDROAKUSTIK GMBH, LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN (LMU), JTI-SOFT (2014): EtWas - Untersuchungen von Fischwanderungen zur Erarbeitung eines Echtzeitwarnsystems an Wasserkraftanlagen. Forschungs- und Entwicklungsprojekt (F&E) im Auftrag der RWE Innogy GmbH, anteilig gefördert durch das Land NRW über die Bezirksregierung Düsseldorf, fachliche Begleitung durch LANUV, MKULNV NRW, Bezirksregierung Köln. Unveröffentlicht.
- BUGEFI ET AL. - BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG, GEWÄSSERMANAGEMENT UND FISCHEREI (BUGEFI), LFV HYDROAKUSTIK GMBH & KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT) (2017): Untersuchungen zum Verhalten und der Evakuierung von Jung- und Kleinfischen im Bereich zwischen Rechenanlage und Turbinenleitapparat bei Wasserkraftanlagen – Freilandvalidierung auf der Grundlage von Modelluntersuchungen im KIT. Im Auftrag des Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes NRW. Unveröffentlicht.
- BÜHNER, M., ZIEGLER, M. (2009): Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler. Pearson Studium, München, 812 S.
- CAMPBELL, N. A., REECE, J. B. (2003): Biologie. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Berlin - Heidelberg, 6. Aufl., 1606 S.
- CARO, P., SHERMANN, T. (2011): Endangered species and a threatened discipline: behavioural ecology. In: Trends in Ecology & Evolution Volume 26 (Issue 3), S. 111–118.
- CHANG, W., CHENG, J., ALLAIRE, J., XIE, Y., MCPHERSON, J. (2017): shiny: Web Application Framework for R, Download unter <https://CRAN.R-project.org/package=shiny>.
- COHEN, J. (1988): Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Lawrence Erlbaum Associates, 579 S.
- CUCHET, M., HARTLIEB, A., RUTSCHMANN (2012): Literaturstudie „Fischabstieg an Wehren“. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Technische Universität München, 48 S.

- DAVIES, N. B., KREBS, J. R., WEST, S. A. (2012): An Introduction to Behavioural Ecology. Wiley-Blackwell, West Sussex, UK, 506 S.
- DEKKER, W. (2018): The history of commercial fisheries for European eel commenced only a century ago. In: Fisheries Management and Ecology 58 (7), S. 1-14.
- DENG, Z., WEILAND, M., FU, T., SEIM, T., LAMARCHE, B., CHOI, E., CARLSON, T., EPPARD, M. (2011): A cabled acoustic telemetry system for detecting and tracking juvenile salmon: part 2. Three-dimensional tracking and passage outcomes. In: Sensors (Basel, Switzerland) 11 (6), S. 5661–5676.
- DENG, Z., LU, J., MYJAK, M., MARTINEZ, J., TIAN, C., MORRIS, S., CARLSON, T., ZHOU, D., HOU, H. (2014): Design and implementation of a new autonomous sensor fish to support advanced hydropower development. In: The Review of scientific instruments 85 (11), S. 115001.
- DIETMAIER, C. (2014): Mathematik für angewandte Wissenschaften. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 717 S.
- DUMONT, U., ANDERER, P., SCHWEVERS, U. (2012): Methoden zur Untersuchung von Fischwanderungen und der Schädigung von Fischen an Wasserkraftstandorten – In: Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 3708 97 200 UBA-FB 001604, Texte 21/2012, 195 S.
- DURIF, C., DUFOUR, S., ELIE, P. (2005): The silvering process of *Anguilla anguilla*: a new classification from the yellow resident to the silver migrating stage. In: Journal of Fish Biology (66), S. 1025–1043.
- DURIF, C., BROWMAN, H., PHILLIPS, J., SKIFTESVIK, A., VØLLESTAD, L., STOCKHAUSEN, H. (2013): Magnetic compass orientation in the European eel. In: PloS one 8 (3), e59212.
- DVWK - DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E. V. (1996): Fischaufstiegsanlagen - Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. Merkblätter 232, 110 S.
- DWA - DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. (2005): Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen - Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle, Hennef, 2. korrigierte Auflage, 256 S.
- DWA - DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. (2014): DWA - Regelwerk - Merkblatt DWA-M 509 – Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung, Hennef, 334 S.
- EBEL, G. (2008): Turbinenbedingte Schädigung des Aals (*Anguilla anguilla*) – Schädigungsraten an europäischen Wasserkraftanlagenstandorten und Mög-

- lichkeiten der Prognose. In: Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, Halle (Saale) Heft 3, 176 S.
- EBEL, G. (2013): Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme, Halle (Saale), 483 S.
- EBEL, G. (2014): Modellierung der Schwimmfähigkeit europäischer Fischarten - Zielgrößen für die hydraulische Bemessung von Fischschutzsystemen. In: Wasserwirtschaft (WaWi) (7/8), S. 40-47.
- EBEL, G., GLUCH, A., KEHL, M. (2015): Einsatz des Leitrechen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl an Wasserkraftanlagen - Grundlagen, Erfahrungen und Perspektiven. In: Wasserwirtschaft (WaWi) (7/8), S. 44–50.
- EBEL, G. (2017): Bemessung und Gestaltung von Fischschutz- und Fischabstiegssystemen - eine kritische Diskussion aktueller ethohydraulischer Befunde. In: Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel (5), 12 S.
- EBEL, G. (2018): Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, Band 4, Halle (Saale), 3. Aufl., 483 S.
- EICKERLING, J. (2018): Untersuchung zum Verhalten von Aalen in ethohydraulischen Tests: Einfluss der Wassertemperatur auf die biologische Aktivität. Masterarbeit. GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER, 78 S.
- EUROPÄISCHE WASSERRAHMENRICHTLINIE (EU-WRRL 2000/60/EG) (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.
- FAHRMEIR, L., KNEIB, T., LANG, S. (2009): Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 2. Aufl., 501 S.
- FAUNA-FLORA-HABITAT-RICHTLINIE (FFH-RL 92/43/EWG) (1992): Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen.
- FESTER, F. (2017): Untersuchung zum Verhalten des Aales *Anguilla Anguilla* in ethohydraulischen Tests – Methodenvvalidierung zum verbesserten Ergebnistransfer vom Modell ins Freiland. Masterarbeit. UNIVERSITÄT BIELEFELD, 52 S.
- FLOCK, A. M. B., WERSÄLL, J. M. D. (1962): A study of the orientation of the sensory hairs of the receptor cells in the lateral line organ of fish, with special reference to the function of the receptors. In: The Journal of Cell Biology (15), S. 19-27.

- FLOECKSMÜHLE (2011): Fischaufstiegsanlage an der Staustufe Baldeney – Machbarkeitsstudie. Im Auftrag des Ruhrverbands. Unveröffentlicht.
- FREIE UND HANSESTADT HAMBURG (2015): Atlas der Fische und Neunaugen Hamburgs – Arteninventar, Ökologie, Verbreitung, Bestand, Rote Liste, Gefährdung und Schutz, 172 S.
- FRETWELL, S. (1975): The Impact of Robert MacArthur on Ecology. In: Annual Review of Ecology and Systematics (Vol. 6), S. 1–13.
- FREUND, J. G., HARTMANN, K. J. (2002): Influence of Depth Distance of Low-Frequency Radio Transmitters in the Ohio River. In: North American Journal of Fisheries Management 22, S. 1301–1305.
- FREYHOF, J. (2009): Rote Liste der im Süßwasser reproduzierenden Neunaugen und Fische (*Cyclostomata* & *Pisces*). In: BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, Hrsg., Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (1): Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands, Band 1: Wirbeltiere, S. 291-316.
- GAYK, J. (2012): Projektbegleitende Untersuchungen im Rahmen von Evakuierungsmaßnahmen von Fischen aus Wasserkraftanlagen: Analyse von körperlichen Beeinträchtigungen und möglichen Stresszuständen. Bachelorarbeit. HOCHSCHULE OSTWESTFALEN-LIPPE, STANDORT HÖXTER, 112 S.
- GERSTMEIER, R., ROMIG, T. (2003): Die Süßwasserfische Europas für Naturfreunde und Angler. Franck-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart, 2. Aufl., 367 S.
- GINNEKEN, V. VAN, MUUSZE, B., BRETELER, J., JANSMA, D., THILLART, G. VAN DEN (2005): Microelectronic detection of activity level and magnetic orientation of yellow European eel, *Anguilla anguilla* L., in a pond. In: Environmental Biology of Fishes (72), S. 313–320.
- GISEN, D. (2018): Modeling upstream fish migration in small-scale using the Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM). Dissertation. UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN, 160 S.
- GODIN, J.-G. (1997): Behavioural Ecology of Teleost Fishes. Oxford University Press, 384 S.
- HADDERINGH, R., BAKKER, H. (1998): Fish Mortality due to Passage through Hydroelectric Power Stations on the Meuse and Vecht Rivers. Fish migration and fish bypasses. Fishing News Books; Distributor, USA, Blackwell Science, Oxford [England], Malden, S. 315–328.
- HAMERS, R., SCHRECKENBACH, K. (2002): Stress bei Fischen. In: Aus Teichwirtschaft und Fischzucht, S. 5-9.

- HAMMER, M., HEDDERGOTT, E., MÖHLENKAMP, M. (2010): Arbeitsbuch Fischerprüfung. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 6. Aufl., 208 S.
- HANKE, W., BRÜCKER, C., BLECKMANN, H. (2000): The ageing of the low-frequency water disturbances caused by swimming goldfish and its possible relevance to prey detection. In: The Journal of experimental biology 203, S. 1193–1200.
- HEINTGES, W. (Hrsg.) (2016): Sicher durch die Fischerprüfung – Allgemeine Fischkunde, Fischkrankheiten, 88 S.
- HELFMAN, G. (1986): Fish behaviour by day, night and twilight. In: The Behaviour of Teleost Fishes, S. 366–387.
- HERWIG, H., SCHMANDT, B. (2018): Strömungsmechanik – Physikalisch-mathematische Grundlagen und Anleitung zum Lösen von Aufgaben. Springer Vieweg, Berlin, 4. Aufl., 452 S.
- HILDEBRANDT, J.-P., BLECKMANN, H., HOMBERG, U. (2015): Penzlin - Lehrbuch der Tierphysiologie. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 8. Aufl., 994 S.
- HOFFMANN, A., SCHMIDT, M., LEHMHAUS, B., LANGKAU, M., KÜHLMANN, M., JESSE, M., KLINGER, H., BELTING, K., WEIMER, P. (2010): Fischschutzmöglichkeiten an Wasserkraftanlagen – Schutzmaßnahmen für Jung- und Kleinfische im Turbinenzuleitungskanal hinter dem Rechen. In: Natur in NRW (4), S. 21–25.
- HOFFMANN, A. (2010): Historisches Vorkommen von ausgewählten Fischarten in Nordrhein-Westfalen, 96 S.
- HOFFMANN, A., KLINGER, H. (2012): Fisch- und Gewässerschutz im Bereich von Wasserkraftanlagen - Projekte und Perspektiven in NRW. In: Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft 45, -61/1- 61/16-.
- HOFFMANN, A., BÖCKMANN, I. (2015): Ethohydraulische Untersuchungen als Funktionsnachweis für den Bau eines Fischliftsystems am Ruhrwehr Baldeney. In: Wasserwirtschaft (WaWi) (11), S. 43–51.
- HOLZNER, M. (2000): Untersuchungen über die Schädigung von Fischen bei der Passage des Mainkraftwerks Dettelbach. Dissertation. TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 351 S.
- ICES - INTERNATIONAL COUNCIL FOR THE EXPLORATION OF THE SEA (2018): Report of the Joint EIFAAC/ICES/GFCM Working Group on Eels (WGEEL) – ICES WGEEL REPORT, Kavala, Greece, 101 S.
- IKSR - INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DES RHEINS (2018): Masterplan Wanderfische Rhein 2018 - eine Aktualisierung des Masterplans 2009, 93 S.
- IMMELMANN, K. (1976): Einführung in die Verhaltensforschung. Verlag Paul Parey, Berlin, Hamburg, 220 S.

- IMMELMANN, K., PRÖVE, E., SOSSINKA, R. (1996): Einführung in die Verhaltensökologie. Pareys Studentexte. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, Wien, 4. Aufl., 287 S.
- JENS, G. (1980): Die Bewertung der Fischgewässer: Maßstäbe und Anleitungen zur Wertbestimmung bei Nutzung, Kauf, Pacht und Schadensfällen. Paul Parey Verlag, Hamburg, Berlin, 2. Aufl., 160 S.
- JENS, G., BORN, O., HOHLSTEIN, R., KÄMMEREIT, M., KLUPP, R., LABATZKI, P., MAU, G., SEIFERT, K., WONDRAK, P. (1997): Fischwanderhilfen: Notwendigkeit, Gestaltung, Rechtsgrundlagen – Schriftenreihe des Verbandes Deutscher Fischereiverwaltungsbeamter und Fischereiwissenschaftler e.V., Heft 11, 114 S.
- JONSSON, N. (1991): Influence of Water Flow, Water Temperature and Light on Fish Migration in Rivers. In: Nordic Journal of Freshwater Research (No. 66), S. 20–35.
- KAESTNER, A. (Hrsg.) (1991): Lehrbuch der Speziellen Zoologie. Teil 2: Fische von Kurt Fiedler, Band II: Wirbeltiere. Gustav Fischer Verlag, Jena, 498 S.
- KAPPELER, P. (2012): Verhaltensbiologie. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 3. Aufl., 641 S.
- KAUERMANN, G., KÜCHENHOFF, F. (2011): Stichproben – Methoden und praktische Umsetzung mit R. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 263 S.
- KEENLEYSIDE, M. (1979): Diversity and Adaptation in Fish Behaviour. Zoophysiology. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 208 S.
- KENWARD, R. (1987): Wildlife Radio Tagging – Equipment, Field Techniques and Data Analysis. Academic Press, Orlando, 222 S.
- KESKINEN, T., MARJOMAKI, T. (2003): Growth of pikeperch in relation to lake characteristics: total phosphorus, water colour, lake area and depth. In: Journal of Fish Biology 63 (5), S. 1274–1282.
- KIT & BUGEFI - KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE & BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG, GEWÄSSERMANAGEMENT UND FISCHEREI (2012): Ethohydraulische Untersuchungen zum Fischschutz an Wasserkraftanlagen – Untersuchungen zum Verhalten und der Evakuierung von Jung- und Kleinfischen im Bereich zwischen Rechenanlage und Turbinenleitapparat bei Wasserkraftanlagen. Im Auftrag des MKULNV NRW. Unveröffentlicht.
- KLEIN, A., BLECKMANN, H. (2015): Function of lateral line canal morphology. In: Integrative zoology 10 (1), S. 111–121.
- KLOPRIES, E.-M., BÖCKMANN, I., HUDJETZ, S., COFALLA, C., SCHILLACK, J., HOFFMANN, A., SCHÜTTRUMPF, H. (2015): Orientierungs- und Suchverhalten



- von Fischen vor Rechenanlagen an Wasserkraftanlagen – Zwischenbericht 1. Im Auftrag der innogy SE, anteilig gefördert vom Land NRW. Unveröffentlicht.
- KLOPRIES, E.-M., BÖCKMANN, I., BRÜLL, C., HOFFMANN, A., HUDJETZ, S., SCHÜTTRUMPF, H. (2017a): Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechen – Anwendung von Ethohydraulik in der wasserbaulichen Forschung. Tagungsband zum 47. Internationalen Wasserbau-Symposium Aachen (IWASA) - Living Rivers - Neues aus Praxis und Forschung, Aachen, S. 112-127.
- KLOPRIES, E.-M., BÖCKMANN, I., FESTER, F., HUDJETZ, S., BRÜLL, C., PUMMER, E., WILMINK, A., HOFFMANN, A., SCHÜTTRUMPF, H. (2017b): Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechenanlagen an Wasserkraftanlagen – Zwischenbericht 2. Im Auftrag der innogy SE, anteilig gefördert vom Land NRW. Unveröffentlicht.
- KLOPRIES, E.-M., BÖCKMANN, I., HOFFMANN, A., SCHÜTTRUMPF, H. (2018): Einfluss geometrischer und hydraulischer Parameter auf das Verhalten abwandernder Fische an Wasserkraftanlagen. In: Bautechnik 95 (12), S. 850-858.
- KLOPRIES, E.-M. (2018): Ethohydraulische und hydronumerische Untersuchungen an Rechen und Kaplan turbinen als Beitrag zur Reduktion der Aalschädigung an Laufwasserkraftanlagen. Dissertation. RWTH AACHEN UNIVERSITY, 306 S.
- KODRIC-BROWN, A. (1985): Female preference and sexual selection for male coloration in the guppy (*Poecilia reticulata*). In: Behavioral Ecology and Sociobiology (17), S. 199–205.
- KÖHLER, W., SCHACHTEL, G., VOLESKE, P. (2007): Biostatistik. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 329 S.
- KREBS, J. R., DAVIES, N. B. (1984): Einführung in die Verhaltensökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York, 356 S.
- KREBS, J. R., DAVIES, N. B. (1996): Einführung in die Verhaltensökologie. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, Wien, 3. Aufl., 484 S.
- KRICKHAHN, T., POSS, D. (2016): Statistik kompakt für Dummies. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 1. Aufl., 288 S.
- KÜHLMANN, M. (2009): Experimentelle Untersuchungen zur Schädlichkeit einer Kleinwasserkraftanlage mit Kaplan turbine und geringer Fallhöhe für Jung- und Kleinfische sowie Rundmäuler. Diplomarbeit. EUROPÄISCHE BERUFS- UND WIRTSCHAFTSAKADEMIE (BWA) ST. GALLEN, 105 S.
- KÜHLMANN, M., WEYAND, M., KNOTTE, H. (2015): Die Wiederherstellung der Fischdurchgängigkeit an der Ruhr-Staustufe Baldeney - Hintergrund und Projektübersicht. In: Wasserwirtschaft (WaWi) 11, S. 14–22.

- LAND MECKLENBURG VORPOMMERN (2009): Rahmenpapier für die landesspezifische Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie in Mecklenburg-Vorpommern, 29 S.
- LAND NRW (2018): Verordnung zum Landesfischereigesetz (Landesfischereiverordnung - LFischVO). Mit Stand vom 14.09.2018.
- LAND, M., NILSSON, D.-E. (2012): Animal Eyes. Oxford University Press, 271 S.
- LANGKAU, M., CLAVÉ, D., SCHMIDT, M., BORCHERDING, J. (2016): Spawning behaviour of Allis shad *Alosa alosa*: new insights based on imaging sonar data. In: Journal of Fish Biology 88 (6), S. 2263–2274.
- LANUV NRW - LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2011): Rote Liste der gefährdeten Pflanzen, Pilze und Tiere in Nordrhein-Westfalen. LANUV Fachbericht, 4. Fassung, 680 S.
- LARINIER, M., TRAVADE, F. (2002): Downstream Migration: Problems and Facilities. In: Bull. Fr. Pêche Piscic. (364 suppl.), S. 181–207.
- LAVES - NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT (2006): Abwanderung von Fischen im Bereich von Wasserkraftanlagen – Untersuchungen an den Wasserkraftanlagen Münden/Dieckhorst, Dringenauer Mühle/Bad Pyrmont und Hannover-Herrenhausen. Christine Lecour, Peter-Christian Rathcke, 1. Auflage, 52 S.
- LEHMANN, B., KAMPKE, W., SCHWEVERS, U., ADAM, B., LINDEMANN, C. (2009): Ethohydraulik - Eine Grundlage für naturschutzverträglichen Wasserbau – Abschlussbericht. Projektnr. 25429 - 33/2. Ein Projekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), 74 S.
- LEHMANN, B., KÜHLMANN, M. (2015): Untersuchungskonzept und -schritte zur Adaption eines Fischliftsystems am Ruhrwehr Baldeney. In: Wasserwirtschaft (WaWi) 11, S. 23–30.
- LEHMANN, B., ADAM, B., ENGLER, O., HECHT, V., SCHNEIDER, K. (2016): Ethohydraulische Untersuchungen zur Verbesserung des Fischschutzes an Wasserkraftanlagen – Ergebnisse des F+E Vorhabens (FKZ 3513 85 0300). In: Bundesamt für Naturschutz, Hrsg., Naturschutz und Biologische Vielfalt 151. Bonn, Bad Godesberg, 156 S.
- LEHMANN, B. (2017): Ethohydraulik - Grundlagen, Einsatzmöglichkeiten, Befunde. In: Biologische Durchgängigkeit von Fließgewässern - Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift WasserWirtschaft, S. Heimerl (Hrsg.), S. 80–90.
- LENDERS, H. J. R., CHAMULEAU, T. P. M., HENDRIKS, A. J., LAUWERIER, R. C. G. M., LEUVEN, R. S. E. W., VERBERK, W. C. E. P. (2016): Historical rise of water-power initiated the collapse of salmon stocks. In: Scientific reports 6, S. 1-9.

- LIAO, J. (2007): A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. In: Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 362 (1487), S. 1973–1993.
- LORENZ, K. (1978): Vergleichende Verhaltensforschung – Grundlagen der Ethologie. Springer-Verlag, Wien, New York, 307 S.
- MADDOCK, I., HARBY, A., KEMP, P., WOOD, P. (2013): Ecohydraulic - An Integrated Approach. JohnWiley & Sons, Ltd, 48 S.
- MARTIN, B., BATESON, P. (2007): Measuring Behaviour – An Introductory Guide. Cambridge University Press, 176 S.
- MKULNV NRW - MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2014): Wasserwirtschaft: Förderung von Durchgängigkeitsmaßnahmen zur Umsetzung des NRW-Bewirtschaftungsplans. Erlass vom 09.09.2014, 6 S.
- MKULNV NRW - MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2015): Fischschutz mit Horizontalrechen. Erlass vom 29.06.2015, 1 S.
- MKULNV NRW - MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2015a): Bewirtschaftungsplan 2016-2021 für die nordrhein-westfälischen Anteile von Rhein, Weser, Ems und Maas, 814 S.
- MKULNV NRW - MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2015b): Wanderfischprogramm Nordrhein-Westfalen. Landesweite Maßnahmen im Bereich Naturschutz und Gewässerökologie Phase 2016–2020. Bearbeitet von Camara, K.; Fey, D.; Nemitz A.; Scharbert, A.; Beeck, P., 28 S.
- MOCKENHAUPT, B., KLÜBER, C. (2015): Fischerfassung in FAA - Reuse vs. automatische Fischerfassung (Vaki-Counter) - Vergleich zweier Verfahren. In: 4. Kolloquium zur Kolloquiumsreihe: Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen am 9./10. Juli 2014 in Koblenz. Forschung und Entwicklung zur Qualitätssicherung von Maßnahmen an Bundeswasserstraßen. S. 64-70.
- MOORE, D. (2016): Applied survival analysis using R. Use R! Springer International Publishing Switzerland, 245 S.
- MORETZ, J., MARTINS, E., ROBISON, B. (2007): Behavioral syndromes and the evolution of correlated behavior in zebrafish. In: Behavioral Ecology 18 (3), S. 556–562.

- MUELLER, M., PANDER, J., GEIST, J. (2017): Evaluation of external fish injury caused by hydropower plants based on a novel field-based protocol. In: *Fisheries Management and Ecology* 24 (3), S. 240–255.
- MUNLV NRW - MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2005): *Handbuch Querbauwerke*. DUMONT, U., Anderer, P., SCHWEVERS, U., 1. Auflage, 214 S.
- MUNLV NRW - MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2009a): *Durchgängigkeit der Gewässer an Querbauwerken und Wasserkraftanlagen*. RdErl. des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz - IV-2-50 32 67 vom 26.01.2009, 10 S.
- MUNLV NRW - MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2009b): *Bewirtschaftungsplan für die nordrhein-westfälischen Anteile von Rhein, Weser, Ems und Maas 2010 - 2015*, 633 S.
- MÜNZ, H. (1989): Functional Organization of the Lateral Line Periphery. In: COOMBS, S. et al., Hrsg., *The Mechanosensory Lateral Line - Neurobiology and Evolution*. Springer-Verlag, New York, S. 285–297.
- MUUS, B. J., DAHLSTRÖM, P. (1993): *Süßwasserfische Europas: Biologie, Fang, wirtschaftliche Bedeutung – BLV Bestimmungsbuch*. BLV Verlagsgesellschaft mbH, München, 7. Aufl., 223 S.
- NAGUIB, M. (2006): *Methoden der Verhaltensbiologie*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 233 S.
- NAISBETT-JONES, L., PUTMAN, N., STEPHENSON, J., LADAK, S., YOUNG, K. (2017): A Magnetic Map Leads Juvenile European Eels to the Gulf Stream. In: *Current biology*: CB 27 (8), S. 1236–1240.
- NAKAYAMA, S., JOHNSTONE, R., MANICA, A. (2012): Temperament and hunger interact to determine the emergence of leaders in pairs of foraging fish. In: *PloS one* 7 (8), e43747.
- NAUMANN, S., HEIMERL, S., STEIN, U. (2018): Empfehlungen des Forums Fischschutz und Fischabstieg. In: *Wasserwirtschaft (WaWi)* (6), S. 119–120.
- NELDER, J. A., WEDDERBURN, R. W. M. (1972): Generalized Linear Models. In: *J. R. Statist. Soc. A*. (135), S. 370–384.
- NICOL, J. A. C. (1989): *The Eyes of Fishes*. Oxford Science Publications, 308 S.
- ØKLAND, F., TEICHERT, M., THORSTAD, E., HAVN, T., HEERMANN, L., SÆTHER, S., DISERUD, O., TAMBETS, M., HEDGER, R., BORCHERDING, J. (2016): Down-

- stream migration of Atlantic salmon smolt at three German hydropower stations – NINA Report. NINA Report No. 1203, S. 1–47.
- OSCHE, G. (1972): Evolution: Grundlagen - Erkenntnisse – Entwicklungen der Abstammungslehre. Verlag Herder, Freiburg im Breisgau, 10. Aufl., 116 S.
- PANKHURST, N. (1982): Relation of visual changes to the onset of sexual maturation in the European eel *Anguilla anguilla* (L.). In: J. Fish. Biol. 21, S. 127–140.
- PAVLOV, D. (1989): Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR. Fisheries Technical Paper, No. 308, Rome, 97 S.
- PAWLOW, I. (1953-1956): Sämtliche Werke. Akademischer Verlag, Berlin.
- PAWLOW, I. (1972): Die bedingten Reflexe – Die grundlegenden Forschungen des russischen Nobelpreisträgers. Kindler Verlag GmbH, München, 247 S.
- PETERS, G. (1979): Zur Interpretation des Begriffs "Stress" beim Fisch – The Interpretation of the Term "Stress" in Fish. Fisch und Umwelt (Fish and Environment). In: Fisch und Tierschutz (Fish and Animal Protection) 7. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, S. 29-32.
- PITCHER, T. (1986): The Behaviour of Teleost Fishes. Croom Helm, London & Sydney, 553 S.
- PUMPHREY, R. (1950): Hearing. In: Symposium Society of Experimental Biology No. 4, Cambridge University Press, S. 3-18.
- PUND, R. (1997): Anwendung hämatologischer Untersuchungsmethoden für Fischblut und Beeinflussung des Blutbildes von Bachforellen (*Salmo trutta f. fario*) durch Haltungs- und Umwelteinflüsse sowie endogene Faktoren. Dissertation. FREIE UNIVERSITÄT BERLIN, 257 S.
- PUTTER, H., FIOCCO, M., GESKUS, R. (2007): Tutorial in biostatistics: competing risks and multi-state models. In: Statistics in medicine 26 (11), S. 2389–2430.
- R CORE TEAM (2017): R: A language and environment for statistical computing, Vienna, Austria, Download unter <https://www.R-project.org/>.
- RANÄKER, L., PERSSON, J., JÖNSSON, M., NILSSON, P., BRÖNMARK, C. (2014): Piscivore-prey fish interactions: mechanisms behind diurnal patterns in prey selectivity in brown and clear water. In: PloS one 9 (11), e102002.
- REEBS, S. (2000): Can a minority of informed leaders determine the foraging movements of a fish shoal? In: Animal behaviour 59 (2), S. 403–409.
- RL 2006/44/EG (2006): Richtlinie des europäischen Parlamentes und des Rates über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig

ist, um das Leben von Fischen zu erhalten, wichtige Angaben zur Gewässerqualität von Fischen.

ROTH, A., BAUMANN, G. (2015): Der Hydro-Fischlift: Eine innovative Lösung für den Fischeaufstieg - Aspekte zu Konstruktion und Betrieb. In: Wasserwirtschaft (WaWi) 11, S. 52–58.

RSTUDIO TEAM (2016): RStudio: Integrated Development for R, Boston, MA, Download unter <https://www.rstudio.com/>.

RÜTER, A. (2013): Die Anpassung der Hörschwelle von einheimischen Fischarten an ihre hydroakustische Umwelt. Dissertation. RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT, BONN, 159 S.

RYDER, R., PESENDORFER, J. (1992): Food, growth, habitat, and community interactions of young-of-the-year burbot, *Lota lota* L., in a Precambrian Shield lake. In: Hydrobiologia 243/244, S. 211–227.

SAUER, K., MÜLLER, K., ROTTLÄNDER, E., REINHARD, P. (1987): Evolution der Pflanzen- und Tierwelt – Ursachen und Mechanismen der Evolution. Fernstudium Naturwissenschaften. Deutsches Institut für Fernstudien an der Universität Tübingen, 217 S.

SCANLAN, M., PUTMAN, N., POLLOCK, A., NOAKES, DAVID L G (2018): Magnetic map in nonanadromous Atlantic salmon. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 115 (43), S. 10995–10999.

SCHILLACK, J. (2014): Untersuchungen zu möglichen Verhaltensänderungen von Fischen bei ethohydraulischen Mehrfachtests im Rahmen der Untersuchungen zum Bau von Fischliftsystemen an der Staustufe Baldeney. Masterarbeit. HOCHSCHULE OSTWESTFALEN-LIPPE, STANDORT HÖXTER, 132 S.

SCHLETTERER, M., SENN, G., MENGHIN, M., HUBMANN, M., SCHWARZENBERGER, R., HAAS, C., THUMSER, P., ASGEIRSSON, M.-T. (2015): Technisches Fischmonitoring: Installation des ersten RiverWatcher Fischzählers in Österreich. In: Wasserwirtschaft (WaWi) (7/6), S. 103–108.

SCHMALZ, W., SCHMALZ, M. (2007): Durchführung systematischer Untersuchungen zur Konzeption funktionsgerechter Wanderhilfen im Bereich von Wasserkraftanlagen am Beispiel der Wasserkraftanlage Camburg/Döbritschen (Thüringen) – Abschlussbericht des DBU geförderten Projektes Az. 18364/01, 198 S.

SCHMALZ, W., WAGNER, F., SONNY, D. (2015): Arbeitshilfe zur standörtlichen Evaluierung der Fischschutzes und Fischabstiegs, S. 1-215.

SCHMIDT, M. (2006): Benefits from hydroacoustics in fisheries management and behavioural studies of coregonids. Dissertation. WILHELMS-UNIVERSITÄT MÜNSTER, 82 S.

- SCHMIDT, M. (2007): Echolote und Sonare in der Binnenfischerei - Möglichkeiten und Perspektiven. In: VDSF-Gewässerseminar, S. 35–37.
- SCHMIDT, M., HOFFMANN, A., HEERMANN, J., LANGKAU, M., ZEYER, M. (2018): Didson-Based Object Tracking (D-BOT) - Fischdetektion in Echtzeit als Maßnahmen- und Schutzinstrument an Wasserkraftanlagen. In: Natur in NRW (9), S. 49–53.
- SCHNEIDER, K. (2017): Ethohydraulische Modellierung. In: 19. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute - Tagungsband Heft 10, S. 17–20.
- SCHOLTEN, M. (2010): Methoden zur Erfassung und Analyse der Fischwanderungen in Bundeswasserstraßen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hrsg.): Ökohydraulische Grundlagen, Mess- und Modellierungsansätze. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW); Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), S. 43–50.
- SCHÜTZ, C., HENNING, M. (2015): Pilotanlagen für den Fischeaufstieg – angewandte Forschung für die Qualitätssicherung von Maßnahmen. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Forschung und Entwicklung zur Qualitätssicherung von Maßnahmen an Bundeswasserstraßen. 4. Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen am 9./10. Juli 2014 in Koblenz.- Veranstaltungen 1/2015, 156 S.
- SCHÜTZ, C., HENNING, M. (2016): Ethohydraulische Untersuchungen von BfG und BAW – In: Kolloquiumsreihe der BAW und BfG "Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der BWaStr - Schlüsselfragen bei der Umsetzung von Maßnahmen zum Fischeaufstieg“ vom 08.-09. Juni 2016, S. 85-92.
- SCHÜTZ, C., HENNING, M. (2017): Verhaltensversuche mit Fischen: Auswirkungen der Dotationszugabe auf die Passierbarkeit von Fischeaufstiegsanlagen. 28. SVK Binnenfischereitagung, Fulda, 12 S.
- SCHWEVERS, U. (1998): Die Biologie der Fischabwanderung. Bibliothek Natur & Wissenschaft Band 11. Verlag Natur & Wissenschaft Solingen, 84 S.
- STAHEL, W. (2002): Statistische Datenanalyse – Eine Einführung für Naturwissenschaftler. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 4. Aufl., 379 S.
- STAHEL, W. (2016): Statistical Issues in Reproducibility. In: ATMANSPACHER, H., MAASEN, S., Hrsg., Reproducibility: Principles, Problems. Practises, and Prospects. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, S. 87–114.
- STEIN, F., DOERING-ARJES, P., FLADUNG, E., BRÄMICK, U., BENDALL, B., SCHRÖDER, B. (2016): Downstream Migration of the European Eel (*Anguilla Anguilla*) in

- the Elbe River, Germany: Movement Patterns and the Potential Impact of Environmental Factors. In: River Res. Applic. 32 (4), S. 666–676.
- TAMURA, T. (1957): A study of visual perception in fish, especially on resolving power and accomodation. In: Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries (22), S. 536–557.
- TEICHMANN, H. (1959): Über die Leistung des Geruchssinnes beim Aal [*Anguilla Anguilla* (L.)]. In: Zeitschrift für vergleichende Physiologie 42, S. 206–254.
- TESCH, F.-W. (1999): Der Aal. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, Wien, 3. Aufl., 397 S.
- THORSTAD, E. B., WHORISKEY, F., UGLEM, I., MOORE, A., RIKARSEN, A., FINSTAD, B. (2012): A critical life stage of the Atlantic salmon *Salmo salar*: behaviour and survival during the smolt and initial post-smolt migration. In: Journal of Fish Biology 81 (2), S. 500–542.
- TIERSchG - BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (2006): Tierschutzgesetz. Tierschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Mai 2006 (BGBl. I S. 1206, 1313), das zuletzt durch Artikel 141 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626) geändert worden ist.
- TIERSchVERSv - BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (2013): Verordnung zum Schutz von zu Versuchszwecken oder zu anderen wissenschaftlichen Zwecken verwendeten Tieren (Tierschutz-Versuchstierverordnung - TierSchVersv). Tierschutz-Versuchstierverordnung vom 1. August 2013 (BGBl. I S. 3125, 3126), die zuletzt durch Artikel 394 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.
- TINBERGEN, N. (1952): The Curious Behavior of the Stickleback. In: Scientific American Vol. 187 (6), S. 22–27.
- TINBERGEN, N. (1967): Tiere untereinander - Formen sozialen Verhaltens. Parey Verlag, Berlin und Hamburg, 2. Aufl., 150 S.
- UBA - UMWELTBUNDESAMT (2011): Populationsdynamik der diadromen Fischarten - Atlantischer Lachs, Meerforelle, Meerneunauge, Flussneunauge und Europäischer Aal – Endbericht, Dessau-Roßlau. THIEL, R. Dr., MAGATH, V., 115 S.
- UBA - UMWELTBUNDESAMT (2015): Forum „Fischschutz und Fischabstieg“ – Empfehlungen und Ergebnisse des Forums „Fischschutz und Fischabstieg“, 53 S.
- VANDERMEER, J. (1972): Niche Theory. In: Annu. Rev. Ecol. Syst 3, S. 107–132.
- VDFF - VERBAND DEUTSCHER FISCHEREIVERWALTUNGSBEAMTER UND FISCHEREIWISSENSCHAFTLER E.V. (2018): Stand des Wissens und der Technik bei Fischschutz- und Fischabstiegssystemen an Wasserkraftanlagen – Fachinformation, 7 S.



- WEICHERT, R., HENEKA, P., HENNING, M., MAHL, L. (2016): Qualitätssicherung bei der Planung von Fischaufstiegsanlagen - Berücksichtigung von Unsicherheiten am Beispiel der Leitströmung. In: Kolloquiumsreihe der BAW und BfG "Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der BWaStr - Schlüsselfragen bei der Umsetzung von Maßnahmen zum Fischaufstieg" vom 08. bis 09. Juni 2016, S. 45–53.
- WENDLING, D. (2017): Entwicklung eines edv-basierten Frühwarnsystems für die Blankaalabwanderung an der Mosel. Dissertation. UNIVERSITÄT LUXEMBURG, 361 S.
- WEY, J., RÜTER, A., SCHOLTEN, M. (2016): Umgang mit fischbiologisch begründeten Unsicherheiten bei der Planung von Fischaufstiegsanlagen. In: Tagungsband zur Kolloquiumsreihe der BAW und BfG "Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der BWaStr - Schlüsselfragen bei der Umsetzung von Maßnahmen zum Fischaufstieg" vom 08.-09. Juni 2016, S. 58–62.
- WHITE, G., GARROT, R. (1990): Analysis of Wildlife Radio-Tracking Data. Academic Press, London, 383 S.
- WINDZIO, M. (2013): Regressionsmodelle für Zustände und Ereignisse – Eine Einführung. Studienskripten zur Soziologie. Springer VS, Wiesbaden, 288 S.
- WINTER, H., JANSEN, H., BRUIJS, M. C. M. (2006): Assessing the impact of hydropower and fisheries on downstream migrating silver eel, *Anguilla anguilla*, by telemetry in the River Meuse. In: Ecology of Freshwater Fish 15 (2), S. 221–228.
- WÖLLECKE, B., ADAM, B., SCHEIFHACKEN, N. (2016): Fischschutz an der Wasserkraftanlage Auerkotten – Monitoring zum Schutz abwandernder Entwicklungsstadien von Lachs und Aal. In: Natur in NRW (2), S. 34–38.
- WOLLSCHLÄGER, D. (2013): R kompakt – Der schnelle Einstieg in die Datenanalyse. Springer Spektrum, Berlin - Heidelberg, 236 S.
- WOLTER, C., SCHOMAKER, C. (2007): Bedeutung von Auen für die Fischfauna und ihre Rolle im ökologischen Monitoring. In: Nationalpark Jahrbuch Unteres Odertal (4), S. 28–37.
- WOLTER, C. (2015): Historic catches, abundance, and decline of Atlantic salmon *Salmo salar* in the River Elbe. In: Aquat Sci 77 (3), S. 367–380.
- ZHDANOVA, I., REEB, S. (2006): Circadian Rhythms in Fish. In: Behaviour and Physiology of Fish, S. 197–238.
- ZIEGLER, A., LANGE, S., BENDER, R. (2002): Überlebenszeitanalyse: Eigenschaften und Kaplan-Meier Methode. In: Deutsche medizinische Wochenschrift (DMW) 127, T14-T16.

- ZIEGLER, A., LANGE, S., BENDER, R. (2007): Überlebenszeitanalyse: Die Cox-Regression. In: Deutsche medizinische Wochenschrift (1946) 132 Suppl 1, e42-4.

## Anhang

## A.1 Steckbrief 1 – Forschungsprojekt „Fischschutz hinter dem Rechen“

Projektbearbeitung:



Auftraggeber:

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,  
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



### Ethohydraulische Untersuchungen zum Fischschutz an Wasserkraftanlagen (kurz: Fischschutz hinter dem Rechen)

#### Anlass und Ziel

Freilanduntersuchungen zu Fischschädigungen an einer Wasserkraftanlage (WKA) im Jahr 2009 zeigten, dass Fische, die in eine WKA eingebracht wurden, durch das Aufsuchen anlagenbedingter strömungsberuhigter Bereiche eine Turbinenpassage vermieden.

Im Rahmen des Projektes wurde das Verhalten von Jung- und Kleinfischen sowie die Wirksamkeit möglicher Schutz- und Ableitrichtungen im Bereich zwischen Rechenanlage und Turbinenleitapparat im Labor untersucht.

#### Projektinfos

Das Projekt wurde vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie und dem Büro für Umweltplanung, Gewässermanagement und Fischerei bearbeitet.

Auftraggeber war das Umweltministerium NRW (MKULNV), fachlich begleitet wurde das Projekt durch das LANUV NRW.

Die ethohydraulischen Untersuchungen wurden in den Jahren 2011 bis 2012 in der Wasserbauhalle des KIT durchgeführt.

#### Vorgehen

Die initialen Beobachtungen wurden im Freiland gewonnen. Auf dieser Grundlage wurde ein ethohydraulisches Modell im Wasserbau-labor des KIT eingerichtet. Die ethohydraulischen Untersuchungen erfolgten in vier aufeinander aufbauenden Phasen:

- ♦ Vorversuche
- ♦ Referenzversuche
- ♦ Hauptversuche
- ♦ Evakuierungsversuche

#### Ergebnisse

In den Vor- und Referenzversuchen wurde ein situatives Modell der WKA, an der die Freilanduntersuchungen durchgeführt wurden, im Labor umgesetzt und erste Verhaltensbeobachtungen an Fischen durchgeführt. In den Hauptversuchen wurde eine Struktur entwickelt, die für die getesteten Fischarten eine Art Schutzzone darstellt. Aus diesem Bereich konnten die Fische in einen Raum geleitet und damit aus dem Bereich des Turbinenzulaufes evakuiert werden (Evakuierungsversuche).

#### Fazit und Ausblick

Zum Abschluss der Untersuchungen konnte eine Evakuierungsstruktur entwickelt werden, die im Jahr 2017 im Rahmen einer Freilandvalidierung an der Wasserkraftanlage im Freiland eingebaut wurde.

## A.2 Steckbrief 2 – Forschungsprojekt „Schaffung der Fischdurchgängigkeit am Ruhr-Wehr Baldeney, Essen“

### Entwicklung und Konstruktion:



### Auftraggeber:



### Projektbearbeitung:



## Schaffung der Fischdurchgängigkeit am Ruhr-Wehr Baldeney, Essen (kurz: Baldeney-Projekt)

### Anlass und Ziel

An der vom Ruhrverband betriebenen Staustufe Baldeney in Essen muss gem. der EU-WRRL die Fischdurchgängigkeit hergestellt werden. Aufgrund der hohen Wasserspiegeldifferenz (8,7 m) und der fehlenden Flächenverfügbarkeit wurde der Einsatz eines Fischliftsystems als Sonderlösung untersucht. Die Funktionsfähigkeit dieses Systems musste im Rahmen ethohydraulischer Tests im Labor nachgewiesen werden. Mittels Freiland- und numerischer Untersuchungen wurde die Position der neuartigen Aufstiegsanlage im Bereich des sog. Rückpumpbauwerkes verortet.

### Projektinfos

Auftraggeber des Projektes war der Ruhrverband, Essen. Das Projekt wurde anteilig vom Umweltministerium NRW über die Bezirksregierung Düsseldorf gefördert. Die Untersuchungen wurden fachlich vom LANUV NRW und weiteren Fachbehörden und Institutionen begleitet.

Die Freiland- und Labor-Untersuchungen wurden von einer interdisziplinär arbeitenden Arbeitsgruppe durchgeführt (BUGeFi, KIT, TUD, LFV Hydroakustik GmbH).

Die Konstruktion und Entwicklung der Fischlifte erfolgte durch die Baumann Hydrotec GmbH & Co. KG und die Hydro-Energie Roth GmbH.

### Vorgehen

Aufbauend auf numerischen und physikalischen Modellen wurde im Jahr 2013 der ethohydraulische Versuchsstand im Maßstab 1:1 im Wasserbaulabor des KIT errichtet.

Das Hauptziel des Projektes war der Nachweis, dass die für die Ruhr relevanten Fischarten die Vorkammer passieren, den Einstieg in den Fischlift finden, in diesen einschwimmen und, nach einer simulierten Transferphase in das Oberwasser, wieder aus dem Lift ausschwimmen.

### Ergebnisse

Insgesamt wurden ca. 800 Individuen aus 15 verschiedenen Fischarten getestet. Alle getesteten Arten haben dabei die Vorkammer passiert, sind in den Fischlift eingeschwommen und nach einer simulierten Liftphase in das Oberwasser ausgeschwommen. Als angemessene Leitströmung aus dem Fischlift hinaus konnte eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s ermittelt werden. Eine zusätzliche Wasser-Dotation in die Vorkammer hinein ermöglichte eine bessere Auffindbarkeit des Systems im Unterwasser.

### Fazit und Ausblick

Derzeit befindet sich das Fischliftsystem am Baldeneysee (Essen) im Bau, die Fertigstellung ist für das Frühjahr 2020 geplant. Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit sind eine anschließende Einstellungsphase und ein Monitoring geplant.

### A.3 Steckbrief 3 - Forschungsprojekt „OVeR“

Projektbearbeitung:



Auftraggeber:



## Orientierungs- und Suchverhalten von Fischen vor Rechenanlagen an Wasserkraftanlagen (kurz: OVeR-Projekt)

#### Anlass und Ziel

Ziel des Projektes war es, das Verhalten abstiegswilliger Fische in Abhängigkeit verschiedener Rechen- und Bypass-Parameter im Labor zu untersuchen, um Erkenntnisse für Bemessungsgrundlagen an Bestandsanlagen zu gewinnen.

Das OVeR-Projekt teilte sich in zwei Module. Modul I beschäftigte sich mit dem Verhalten von Fischen vor verschiedenen Rechen. Modul II untersuchte schwerpunktmäßig einen seitlichen Bypass.

#### Projektinfos

Das Projekt wurde vom Büro für Umweltplanung, Gewässermanagement und Fischerei (BUGeFi) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen University bearbeitet.

Das Projekt wurde von innogy SE finanziert und finanziell von der Bezirksregierung Köln und dem Umweltministerium NRW (MULNV) im Rahmen des Programms *Lebendige Gewässer in NRW* unterstützt.

Der Projektzeitraum lag zwischen Januar 2015 und Oktober 2018.

#### Vorgehen

Im Rahmen des Moduls I wurden Aale, Äschen, Flussbarsche, Lachssmolts und Rotaugen getestet. Das Verhalten der Fische bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten (0,3; 0,45; 0,6; 0,8 m/s) und verschiedenen Rechenstababständen (10, 20, 40 mm) wurde untersucht. Darüber hinaus wurden vertikal um 30° bzw. 70° geneigte Rechen getestet.

Für das Modul II wurde ein seitlicher Bypass mit Lachssmolts, Rotaugen und Blankaalen getestet. Dabei wurden Stababstände von 20, 40 und 60 mm sowie Strömungsgeschwindigkeiten von 0,3 und 0,5 m/s im Bypasseingang getestet.

#### Ergebnisse

Nach Abschluss des ersten Moduls lagen Ergebnisse vor, die deutlich machen, dass Fische einen Rechen in artspezifisch unterschiedlicher Weise sondieren und diesen abhängig von Stababstand und Anströmgeschwindigkeit passieren, sofern die Möglichkeit besteht und keine anderen Wege zur Verfügung stehen.

Im Rahmen des Moduls II konnte im ethohydraulischen Modell eine gute Ableiteffizienz eines seitlichen Bypasses für Lachssmolts, Rotaugen und Blankaale nachgewiesen werden.

#### Fazit und Ausblick

Unter Berücksichtigung verschiedener Modelleffekte ist es möglich, die im Labor gewonnenen Erkenntnisse auf Situationen im Freiland zu übertragen. Für den Einsatz eines seitlichen Bypasses an bestehenden Wasserkraftanlagen müssen in einem nächsten Schritt Freilanduntersuchungen durchgeführt werden, bei denen Maßnahmen für eine großräumige Auffindbarkeit des Bypasses untersucht werden.

## A.4 Das Softwarepaket *R*

*R* ist eine frei verfügbare Programmiersprache und Programmierumgebung zur computergestützten Datenverarbeitung (KAUERMANN & KÜCHENHOFF 2011, WOLLSCHLÄGER 2013, R CORE TEAM 2017). Das Programm bietet die Möglichkeit, Daten zu organisieren, zu transformieren, (statistisch) auszuwerten und darzustellen (WOLLSCHLÄGER 2013). Unter Mitarbeit einer großen wissenschaftlichen Gemeinschaft gibt es neben der Basis-Software eine Anzahl von verschiedenen Paketen, die ebenfalls kostenlos im Internet zur Verfügung gestellt werden. Auswertungen werden mittels einer Abfolge von Befehlen in Textform durchgeführt. Hierbei ist die Einhaltung einer bestimmten Syntax zu berücksichtigen (WOLLSCHLÄGER 2013). Jeder Befehl stellt dabei einen eigenen Schritt dar, eine komplexe Analyse setzt sich so aus einer Reihe von verschiedenen Auswertungsschritten zusammen, die vom Benutzer selbst einzugeben sind (WOLLSCHLÄGER 2013).

Anders als bei Programmen mit grafischer Benutzeroberfläche erfordert *R* eine vergleichsweise längere Einarbeitungszeit, da hierbei die Kenntnis textlicher Befehlsausdrücke erforderlich ist. Eine Erleichterung bietet die Software *RStudio* (RSTUDIO TEAM 2016), die beispielsweise eine Autovervollständigung, Syntaxhervorhebungen oder Hinweise auf Syntaxfehler gibt. Nachdem ein gewisses Grundverständnis für die Befehle und Syntax von *R* erworben wurde, bietet das Programm allerdings viele Vorteile bei der Auswertung von Daten. So lassen sich bei häufig wiederkehrenden Arbeitsschritten einmal erstellte Sequenzen immer wieder verwenden (WOLLSCHLÄGER 2013), was beispielsweise langfristig die Effizienz der Auswertung von Datentabellen mit gleicher Struktur erhöht. Darüber hinaus können Fehlerquellen ausgeschlossen werden, sobald Befehlssequenzen einmal validiert sind und für verschiedene Daten angewendet werden. Auch eine Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern ist möglich, die über die Weitergabe die Sequenzen transparent überprüfen und anwenden können. Demnach wird mittels *R* auch die Auswertungsobjektivität gesteigert (WOLLSCHLÄGER 2013).

Die Homepage des R-Projektes bietet eine zentrale Plattform für den kostenlosen Download des Programmes und weiterer Zusatzpakete sowie für verschiedene frei verfügbare Literatur und Informationen rund um *R*: <https://www.r-project.org/>.

### Das Zusatzpaket *shiny*

Über das Zusatzpaket *shiny* (CHANG et al. 2017) bietet *R* die Möglichkeit, die Befehlssequenzen in einer benutzerfreundlichen Anwendung zu integrieren (<https://shiny.rstudio.com/>). Die mit *R* und dem Zusatzpaket *shiny* entwickelten Sequenzen können weitergegeben und von Dritten ohne weitergehende Programmierkenntnisse genutzt werden. Zur Nutzung ist die Installation von *R* nicht unbedingt erforderlich, da die Anwendung alternativ auch auf eine Plattform hochgeladen und von dort abgerufen werden kann. Grundsätzlich erfolgt die Umsetzung eines mit *shiny* entworfenen Programms mittels zweier R-Skripte, dem *User Interface* (UI) sowie dem *Server*. Im UI kann die Benutzeroberfläche der Anwendung gestaltet werden. Die Anwendung kann nach eigenen Vorstellungen aufgebaut werden; hierzu zählt die Farbe

der Benutzeroberfläche oder verschiedene Themen, die in einer Seitenleiste integriert werden können. Auch Rechenoperationen zu statistischen Datenauswertungen können mithilfe des Zusatzpaketes hochgeladen und nach einem zuvor festgelegten Schema angewendet und die Ergebnisse dargestellt werden. Die dafür notwendigen Befehle zum Umgang mit Daten, die hochgeladen werden, finden sich im *Server*.



**A.5 Checkliste für ethohydraulische Untersuchungen****Checkliste für ethohydraulische Laboruntersuchungen**

Diese Handlungsanleitung dient der Qualitätssicherung während der Planung und Durchführung ethohydraulischer Tests und gewährleistet so eine standardisierte Vorgehensweise und Datenauswertung

☐ **I. Formulierung der Fragestellung(en) / Hypothese(n)**☐ **II. Stichprobenplanung**

- ☐ Ermittlung der Anzahl benötigter Versuchstiere

☐ **III. Fischphysiologische Grundlagen (Sinnesorgane)**

- ☐ Optischer Sinn (Ausschluss optischer Beeinflussungen etc.)
- ☐ Strömungssinn (Vermeidung v. Erschütterungen, Vibrationen etc.)
- ☐ Gehör- und Gleichgewichtssinn (Vermeidung von Erschütterungen, Störgeräuschen, Lärm etc.)
- ☐ Geruchs- und Geschmackssinn (Ausschluss von olfaktorischen od. gustatorischen Einflüssen)

☐ **IV. Bauliche Grundlagen**

- ☐ Einrichtung eines ethohydraulischen Modells mit Steuerungs- und Messtechnik (1:1 Ausschnittsmodell)
- ☐ Ausschluss strömungsberuhigter Bereiche
- ☐ Vermeidung von Schatten und Reflexionen
- ☐ Farblich einheitliche Umgebung
- ☐ Einrichtung eines Beobachtungsraums (Ausschluss von Beobachtereffekten)

☐ **V. Verhaltensbiologische Grundlagen**

- ☐ Vorhandensein der Motivation der Probanden
- ☐ Angemessene Gruppengröße, passende Zusammensetzung der Testgruppen
- ☐ Wiederholte Verwendung von Probanden möglich?
- ☐ Stressvermeidung

## Checkliste für ethohydraulische Laboruntersuchungen

### ☐ VI. Chemisch-physikalische Grundlagen

- ☐ Anpassung der Wassertemperatur (Hälterungsanlage / Versuchsrinne)
- ☐ Anpassung des Sauerstoffgehalts
- ☐ Einstellung des pH-Wertes (Optimum: ~7)
- ☐ Anpassung/Einstellung weiterer Parameter (z. B. Nitrit, Nitrat)

### ☐ VII. Tierschutzrechtliche Grundlagen

- ☐ Antrag auf Genehmigung eines Tierversuchs
- ☐ Antrag auf Hälterung von Fischen
- ☐ Beantragung weiterer Genehmigungen (Elektrobefischung, kurzzeitige Entnahme von Wildfischen, Zurücksetzen)
- ☐ Beantragung einer Transportgenehmigung

### ☐ VIII. Vorversuche (qualitative Untersuchungen)

- ☐ Überprüfung des Setups (Funktionstest des ethohydraulischen Modells mit Versuchsfischen)
- ☐ Ausschalten störender Parameter und Artefakte
- ☐ Rückkopplung mittels hydraulischer Messungen bzw. numerischer Berechnungen

### ☐ IX. Hauptversuche (quantitative Untersuchungen)

- ☐ Planung des Versuchsablaufs
- ☐ Festlegung der aufzunehmenden Daten
- ☐ Bestimmung der Anzahl an Versuchswiederholungen
- ☐ Umsetzung einer zufälligen zeitlichen Abfolge der Setups (Randomisierung)
- ☐ Datenaufnahme
- ☐ Statistische Datenauswertung (deskriptive, schließende Statistik)

## Glossar

abiotische Faktoren	chemische und physikalische Umweltfaktoren (z. B. Wassertemperatur), die einen Einfluss auf ein Lebewesen haben
ADV	Abkürzung für Acoustic Doppler Velocimeter; Gerät zum Messen der Strömungsgeschwindigkeit in drei Raumrichtungen
$\alpha$ -Fehler	Irrtumswahrscheinlichkeit, auch Signifikanzniveau $p$ oder $\alpha$ -Fehler genannt; gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Nullhypothese fälschlicherweise verworfen wird, obwohl sie in Wirklichkeit korrekt ist
anadrome Fische	Fische, die zur Reproduktion in Flüsse aufsteigen, z. B. Lachse
Anthropomorphisierung	Anwendung menschlicher Eigenschaften auf Tiere
Ausbauwassermenge	Maximale Wassermenge, die bei einer Wasserkraftanlage durch die Turbinenanlage geführt werden kann
Ausschnittsmodell	Abbildung wesentlicher Segmente einer Realsituation aus dem Freiland im Labormodell im Maßstab 1:1
$\beta$ -Fehler	gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Nullhypothese fälschlicherweise angenommen wird, obwohl die Alternativhypothese korrekt ist
binäre Daten	Daten, die nur zwei Merkmalsausprägungen besitzen, z. B. ja / nein
biotische Faktoren	Umweltfaktoren, an denen Lebewesen beteiligt sind, z. B. Konkurrenz, Prädation
Blankaal	flussabwärts wandernde Aale, die zur Reproduktion vom Süßwasser ins Meer (Sargassosee) schwimmen
Carry-Over-Effekt	Sequenzeffekt, der bei Mehrfachverwendung eines Probanden aufgrund eines Übertragungseffektes Einfluss auf dessen Verhalten hat. Zum Beispiel kann durch den Fang mittels Kescher bei Teilnahme an einem erneuten Versuch eine Meidereaktion ausgelöst werden.
Crossover-Verfahren	Beim Crossover-Design werden dieselben Versuchsgruppen in unterschiedlichen Setups getestet. So kann eine Gewöhnung der Tiere an eine bestimmte Struktur weitestgehend ausgeschlossen werden.
deskriptive Statistik	auch: beschreibende Statistik; stellt empirisch aufgenommene Daten in Form von Tabellen, Lageparametern und Grafiken übersichtlich dar; bildet die Grundlage für schließende Statistik

diadrome Fische	Fische, die Wanderungen zwischen dem Salz- und dem Süßwasser durchführen
digitaler Verfahrenskatalog (diVe)	Der Verfahrenskatalog soll der Qualitätssicherung während der Planung und Durchführung ethohydraulischer Tests dienen. Neben einer standardisierten Bewertung reizinduzierter Fischreaktionen ermöglicht die Anwendung der Kataloginhalte eine Auswertung von ethohydraulisch zählbaren Ereignissen mittels schließender Statistik.
Ethogramm	schriftliches oder graphisches Verzeichnis klar definierter Verhaltensweisen einer Tierart, Beispiel Fisch: Orientierungsverhalten: positive Rheotaxis, negative Rheotaxis, Verharren
Ethohydraulik	Synthese der biologischen Teildisziplin der Verhaltensforschung und dem ingenieurwissenschaftlichen Fachgebiet der Hydraulik
Grundgesamtheit	statistische Einheit, über die man auf der Grundlage einer repräsentativen Stichprobe Aussagen treffen möchte, z. B. eine bestimmte Fischart
Histogramm	Darstellungsform von Häufigkeitsverteilungen aufgenommener Beobachtungen bzw. Ereignisse in verschiedenen Klassen in Form eines Balkendiagramms
Horizontalrechen	Rechen mit horizontal ausgerichteten Stäben, auch als Schrägrechen bezeichnet
Impingement	Angepresstwerden eines Fisches an eine mechanische Barriere, z. B. an einen Fischschutzrechen
<i>in situ</i>	im Freiland; Beobachtung von Tieren in ihrer natürlichen Umgebung
interspezifische Gruppe	Gruppe verschiedener Arten von Lebewesen
intraspezifische Gruppe	Gruppe einer Art von Lebewesen
katadrome Fische	Fische, die zur Reproduktion ins Meer absteigen, z. B. Aale
Konfidenzintervall	Intervall, das mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (1-Signifikanzniveau) den Bereich angibt, der bei unendlicher Wiederholung einer Schätzung die wahre Lage des Parameters einer Grundgesamtheit (z. B. Einschwimmrate von Fischen in einen Bypass bei einem bestimmten Setup) einschließt
Korrelation	beschreibt die Beziehung zweier oder mehrerer Variablen zueinander
Lachssmolt	juveniler Lachs, der im Zuge seiner Entwicklung vom Süßwasser ins Meer abwandert

Lebenszeit-Analyse	auch: Survival-Analyse; statistisches Verfahren, bei dem die Zeit bis zum Eintreten eines bestimmten Ereignisses zwischen Gruppen verglichen wird
limnophile Fische	langsam fließende oder stehende Gewässer bevorzugend
Ökohydraulik	interdisziplinäres Forschungsfeld, das sich mit den Wechselwirkungen physikalischer, biologischer und chemischer Prozesse in aquatischen Ökosystemen beschäftigt
ökologische Nische	Gesamtheit der Ansprüche eines Organismus an die abiotischen und biotischen Umweltfaktoren
potamodrome Fische	Fische, die, im Gegensatz zu diadromen Fischarten, nur Wanderungen innerhalb des Süßwassers durchführen
proximate Ursachen von Verhalten	Faktoren, die das Verhalten eines Organismus unmittelbar auslösen: Hierzu zählen interne Faktoren, wie z. B. physiologische Mechanismen.
Randomisierung	zufällige Zuteilung von zu untersuchenden Setups
Regression	Verfahren der schließenden Statistik, die es ermöglichen, den Einfluss einer oder mehrerer unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable zu bestimmen
rheophile Fische	schnell fließende Gewässer bevorzugend
schließende Statistik	Mithilfe der schließenden Statistik kann überprüft werden, ob sich ein bestimmtes beobachtetes Verhalten bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen (z. B. zwei verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten) tatsächlich aufgrund dieses Parameters unterscheidet oder ob es rein zufällig bedingt ist. Kann bei den Beobachtungen ein zufälliger Zusammenhang ausgeschlossen werden, ist ein signifikanter Unterschied zwischen den Verhaltensweisen infolge der getesteten Bedingungen und damit ein Einfluss des getesteten Parameters auf das Verhalten nachgewiesen. Das Ergebnis kann im Fall einer repräsentativen Stichprobe dann auf die Grundgesamtheit (z. B. eine Fischart, eine Population oder Fische einer bestimmten Körperlängenklasse) übertragen werden.
Sequenzeffekte	Störeinflüsse, die bei der Mehrfachverwendung von Probanden einen Einfluss auf das Verhalten dieser haben können, z. B. Ermüdungserscheinungen, wenn ein Fisch zuvor bei einer höheren Strömungsgeschwindigkeit getestet wurde
signifikanter Unterschied	Statistische Signifikanz bedeutet, dass die erkannte Abhängigkeit zu groß ist, um noch als zufällig gelten zu können.

situative Ähnlichkeit	Vergleichbarkeit zwischen der Situation im Freiland und dem Modell im Labor; Das „situativ ähnliche Modell“ muss alle wesentlichen Eigenschaften der Situation im Freiland abbilden.
statistischer Test (Hypothesentest)	Im statistischen Test wird eine zuvor aufgestellte Nullhypothese (kein Einfluss eines Parameters bzw. kein Unterschied zwischen Gruppen) anhand zuvor aufgenommener Versuchsdaten mittels mathematischer Testverfahren auf ihre Gültigkeit überprüft. Wird die Nullhypothese ( $H_0$ ) verworfen, wird die Alternativhypothese ( $H_1$ ) angenommen.
Stichprobe	alle untersuchten Einheiten zusammengefasst, z. B. alle Fische eines Setups
Stichprobenplanung	Im Rahmen der Stichprobenplanung wird die Frage beantwortet, wie viele Tiere für die Untersuchungen benötigt werden, um anhand einer begrenzten Anzahl an Individuen repräsentative Aussagen für eine bestimmte Gruppe, Population oder Art treffen zu können
ultimate Ursachen von Verhalten	Im Falle von ultimativen Faktoren geht es darum, welche Konsequenz bzw. welchen Anpassungswert ein bestimmtes Verhalten für den Überlebens- bzw. Fortpflanzungserfolg eines Individuums hat.
Vertikalrechen	Rechen mit vertikal ausgerichteten Stäben

## Danksagung

Vielen Dank an all diejenigen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ganz besonders gilt mein Dank dabei...

... Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann für das mir entgegengebrachte Vertrauen in meine Fähigkeiten und die Bereitstellung dieses interessanten Forschungsthemas im spannenden Feld der Ethohydraulik. Vielen Dank für die Unterstützung während der gesamten Zeit.

... Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf für die Unterstützung bei der Fertigstellung dieser Arbeit und die Begutachtung meiner Arbeit.

... Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek für die Begutachtung dieser Arbeit.

... Dr. Andreas Hoffmann für die Unterstützung und Freiräume bei der Erstellung dieser Arbeit, für die vielen fachlichen Hinweise, Ratschläge und Diskussionen zum Thema, der stets offenen Tür und dem mentalen Aufbau, wenn es mal nicht so gut lief.

... Till Schneider und Dr. Kirsten Theobald (innogy SE) für den spannenden fachlichen Austausch während der OVeR-Untersuchungen und den wertvollen Input.

... Prof. Dr.-Ing. Thomas Grünebaum und Dr. Michael Weyand (Ruhrverband) für das Interesse an meiner Arbeit, den fachlichen Austausch und die finanzielle Unterstützung. Markus Kühlmann danke ich herzlich für die fachliche Expertise in fischökologischen Fragen und dafür, dass die Laborarbeit immer mit Spaß verbunden war, so dass es während der ethohydraulischen Untersuchungen nie langweilig wurde.

... Prof. Dr. Göran Kauermann (LMU München) für die fachliche Unterstützung bei den statistischen Fragen; Cornelius Fritz für die Beantwortung der statistischen Fragen über das Projekt hinaus sowie Julia Fried und Dominik Kreiß. Danke an euch, dass ich so viel über das wunderbare Programm R lernen konnte.

... meinen lieben Kolleginnen und Kollegen: Christine Wollschläger, Fabian Fester, Jan Eickerling, Jennifer Heermann, Kathrin Henning, Nils Hoffmann und Sebastian Brock. Vielen Dank für die fachlichen und manchmal vielleicht auch nicht so fachlichen Diskussionen, herzlichen Dank für so viel Spaß bei der Arbeit und eure Unterstützung!

... den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IWG in Karlsruhe. Vielen Dank an Philipp Schultz und Dr. Frank Seidel für die nette Zeit im schönen und immer sonnigen Karlsruhe und an das Team aus der Werkstatt für die tatkräftige Unterstützung bei den Untersuchungen.

... den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IWW Aachen. Vielen Dank an Dr. Elena Klopries, Dr. Catrina Brüll, Anna Wilmink und Dr. Sebastian Hudjetz für die angenehme Arbeitsatmosphäre und den fachlichen Austausch während der Untersuchungen in Aachen. Danke an Bernd Böckmann für die geniale Protokollanwendung und auch an das Team der Werkstatt für die Hilfe beim Umbau und den leckeren Kaffee.

... dem Team der LFV Hydroakustik GmbH: Dr. Marc Schmidt und Dr. Manuel Langkau.

.... Dr. Hubert Spieth für das geweckte Interesse an den so faszinierenden, aquatischen Lebewesen, die oft unterschätzt werden.

... meinen Freunden für all den Zuspruch und die Ablenkung. Vielen Dank, dass ihr immer da wart!

... meinen Eltern, die immer an mich geglaubt haben. Danke, dass ihr immer für mich da seid. Danke dem Rest der Familie für die entspannten gemeinsamen Aktivitäten zur Ablenkung in dieser Zeit.

... Ingo für die uneingeschränkte Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit. Danke für alles!



## Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erarbeitet habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt.

Weiterhin erkläre ich, dass die vorliegende Dissertation weder vollständig noch teilweise einer anderen Fakultät mit dem Ziel vorgelegt worden ist, einen akademischen Titel zu erwerben und dass dies mein erster Promotionsversuch ist.

Für den Fall, dass die Arbeit zusätzlich auf einem Datenträger eingereicht wird, erkläre ich, dass die schriftliche und die elektronische Version vollständig übereinstimmen.

Bielefeld, den 08.10.2019

---

(Imke Böckmann)

## GESAMTVERZEICHNIS

der bisherigen „Technischen Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik“

*Bestellungen beim  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung  
Franziska-Braun-Straße 7, D-64287 Darmstadt*

- |  |   |
|--|---|
| <b>Nr. 1/1965</b><br>H. Lacher                 | (vergriffen)<br>Über das Kriechverhalten destillierter Bitumina unter Zugrundelegung der Theorie der linearen Viskosität  |
| <b>Nr. 2/1966</b><br>J. Bock                   | Einfluß der Querschnittsform auf die Widerstandsbeiwerte offener Gerinne  |
| <b>Nr. 3/1967</b><br>P. Unger                  | (vergriffen)<br>Berechnung instationärer Abflußvorgänge in natürlichen Gerinnen unter Verwendung eines von der Gerinneform unabhängigen Rauigkeitsmaßes         |
| <b>Nr. 4/1968</b><br>W. Tiedt                  | (vergriffen)<br>Berechnung des laminaren und turbulenten Reibungswiderstandes konzentrischer und exzentrischer Ringspalte                                       |
| <b>Nr. 5/1969</b><br>R. Schröder<br>B. Scherer | Häufigkeitsanalyse hydrologischer Daten<br>Unverzerrtes Hele-Shaw-Modell für instationäre Grundwasserströmungen mit freier Oberfläche                           |
| <b>Nr. 6/1970</b><br>D. Krause                 | Einfluß der Trassierungselemente auf den Spiegelverlauf in gekrümmten Schussrinnen  |
| <b>Nr. 7/1971</b><br>W. Tiedt                  | Hydrodynamische Untersuchung des Teilfüllungsproblems, Gesetzmäßigkeiten des Abflusses in technisch rauhen Kreisgerinnen bei laminarer und turbulenter Strömung |
| <b>Nr. 8/1972</b><br>M. T. Monzavi             | Widerstandsgesetz auf statistischer Basis für extreme natürliche Rauigkeiten in Druckrohren   |
| <b>Nr. 9/1973</b><br>B. Scherer                | Die Entwicklung und Anwendung eindimensionaler Modelle der zweidimensionalen Grundwasserbewegungen in Fluß-, Graben- und Drainnähe                              |
| <b>Nr. 10/1973</b><br>diverse Autoren          | (vergriffen)<br>Sammlung von Kurzberichten 1965 – 1972  |

- Nr. 11/1974** (vergriffen)  
 E. Zäschke Widerstandsmindernde Wirkung hochmolekularer Zusätze beim Transport Newtonscher Flüssigkeiten in geschlossenen Leitungen  
 R. Schröder u. Über das hydraulische Widerstandsverhalten von Beton- und Stahlbeton-  
 D. Knauf rohren im Übergangsbereich  
 H. Lacher Konstruktionshilfe für Strömungsnetze ebener Potentialströmungen mittels Elementarströmungen  
 H. Lacher u. Einfluß von Teilfüllungsgrad und von Wanddicke des porösen  
 M. T. Monzavi Rohrmantels auf die Ergiebigkeit von Betonfilterrohren  
 H. Lacher u. Untersuchung zur Ermittlung der Abflußleistung poröser Betonfilterrohre  
 K. J. Ueker unter natürlichen Bedingungen  
 G. Euler u. Berechnung von Hochwasserabläufen mit Näherungsverfahren und  
 A. Koussis Anwendung  
 H. Lacher Neuere Methoden der Wissensvermittlung im Fach „Hydraulik“, erläutert am Lehrbeispiel „Hydrostatik räumlich gekrümmter Oberflächen“
- Nr. 12/1974**  
 H. J. Dallwig Fließformeln und Formbeiwert - eine kritische Untersuchung üblicher  
 Berechnungsmethoden für Gerinneströmungen  
 R. Schröder Wirkung periodischer Wandwelligkeiten auf den Strömungswiderstand
- Nr. 13/1974** (vergriffen)  
 D. Belke Die statistische Analyse von Grundwasserständen mit dem Ziel der Extremwertprognose
- Nr. 14/1975** (vergriffen)  
 G. Euler Die Simulation der Niederschlagsaufteilung für Hochwasserabfluß-Modelle
- Nr. 15/1975**  
 A. Koussis Ein verbessertes Näherungsverfahren zur Berechnung von Hochwasser-  
 abläufen
- Nr. 16/1975**  
 G. Lass Berechnung von Horizontalfilterbrunnen mit beliebig angeordneten  
 Filterrohren
- Nr. 17/1976** (vergriffen)  
 D. Knauf Die Abflußbildung in schneebedeckten Einzugsgebieten des Mittelgebirges
- Nr. 18/1977**  
 H. Bischoff Die Berechnung von Potentialfeldern mit der Randintegralmethode,  
 dargestellt am Beispiel der ebenen Grundwasserbewegung
- Nr. 19/1977**  
 I. David Grundwasserfassungsanlagen mit Filterrohren
- Nr. 20/1977** (vergriffen)  
 Diverse Autoren Sammlung von Kurzberichten 1972 - 1977
- Nr. 21/1978**  
 O. Gieseler Einfluss der äquivalenten Sandrauheit auf die Lage des Wechselsprungs  
 bei Umlenkung eines frei fallenden runden Flüssigkeitsstrahls an einer  
 ebenen Platte

**Nr. 22/1978**

- R. Schröder      Forschungsarbeiten des Instituts für Hydraulik und Hydrologie  
D. Belke u.      Simulation zur Nutzraumoptimierung einer Talsperre  
G. Euler u.      Ein detailliertes mathematisches Modell zur Simulation von Hochwasserwellen am Beispiel der Nidda
- R. Wackermann  
T. Brandt      Der Austausch von Oberflächen- und Grundwasser  
R. Schröder      Gestaltung von Offshore-Bauwerken für die Kühlwasserversorgung thermischer Kraftwerke
- H. Lacher u.      Zum Problem des Regenwasserabflusses auf Fahrbahnen  
F. Thiele  
W. Tiedt      Druckspüler/Spülkasten - ein Beitrag zur Hydraulik zweier Spülsysteme der Sanitärtechnik  
O. Gieseler      Hydraulische und mechanische Verfahren zur Ermittlung von Rauigkeiten

**Nr. 23/1978**

- A. Holderbaum      Hydraulische Untersuchung zur Ermittlung der Wasserfilmdicken auf berechneten Fahrbahnoberflächen

**Nr. 24/1979**

- T. Brandt      Modell zur Abflussgangliniensimulation unter besonderer Berücksichtigung des grundwasserbürtigen Abflusses

**Nr. 25/1980**

- N. Könnemann      Der wechselseitige Einfluss von Vorland und Flussbett auf das Widerstandsverhalten offener Gerinne mit gegliederten Querschnitten

**Nr. 26/1981**

- R. Wackermann      Ein Rasterverfahren mit flächenvariabler Systemfunktion zur Simulation von Hochwasserganglinien aus großen Einzugsgebieten

**Nr. 27/1981**

- A. Holderbaum      Modellversuche zum Abfluß von Niederschlagswasser auf Verwindungs-Strecken

**Nr. 28/1982**

- H. J. Dallwig      Zur Leistungsfähigkeit von Kelchüberfällen

**Nr. 29/1982**

- R. Schröder      In memoriam Hannes Lacher - Geleitwort  
H. Lacher      Über die viskoelastischen Eigenschaften von destilliertem Bitumen  
H. Lacher u.      Experimentelle Erfahrungen mit Filterrohren als Grundlage ihrer hydraulischen Bemessung  
R. Schröder  
H. Lacher      Grundwasserabfluss mit freier Oberfläche, Auszug aus dem Textbuch zur Technischen Hydraulik
- H. Lacher      Anwendung der Randintegralmethode zur Berechnung der  
B. Söhngen      Leistungsfähigkeit von teilgefüllten Rohren  
H. Bischoff  
H. Lacher      Verallgemeinertes Berechnungsverfahren nach Dupuit-Forchheimer für Grundwasserleiter beliebig hoher Durchlässigkeit
- H. Lacher      Anwendung der Feldintegralmethode zur Berechnung der  
H. Bischoff      Durchströmung von Steinschüttedämmen  
B. Söhngen
- F. Zior u.      Ein neues Messverfahren für die Bestimmung der  
H. Lacher      Oberflächenrauigkeit von Kanalwandungen  
H. Gerdes u.      Die Berechnung dreidimensionaler Grundwasserströmung mit Mitteln  
H. Lacher      der ebenen Potentialtheorie

Fortsetzung Nr. 29/1982

- F. Zior u.            Entwicklung einer konduktometrischen Sonde zur Messung von  
H. Lacher            Wasserfilmdicken auf Fahrbahnoberflächen  
H. Lacher u.        Schiffahrtsbedingte Wasserdruckausbreitung in Kanalböschungen  
E. Zäschke  
F. Thiele u.        Probleme der Straßenentwässerung und neue Bemessungsmethoden  
H. Lacher            Die Berechnung der Ergiebigkeit von Drainagesystemen in horizontal  
B. Söhngen,        ausgedehnten Grundwassersystemen  
H. Bischoff u.  
H. Lacher            Zur Begründung der Konzentrationszeit aus der Sicht der Hydraulik  
H. Lacher            Humor im Wasserbaulichen Versuchswesen: Versuchsanordnung zur  
Bestimmung der äquivalenten Sandrauhigkeit von Steinzeugrohren

**Nr. 30/1983**

- Diverse Autoren    Sammlung von Kurzberichten 1978 - 1983

**Nr. 31/1983**

- F. Thiele            Fahrbahnlängsentwässerung im Straßengerinne und ein Entwurf für  
zukünftige Richtlinien zur Bemessung

**Nr. 32/1984**

- U. Höfer            Beginn der Sedimentbewegung bei Gewässersohlen mit Riffeln oder  
Dünen

**Nr. 33/1985**

- G. Euler            Die Berechnung des Schmutzwasserabflusses aus Niederschlägen:  
C. Heinzelmann    Eine vergleichende Darstellung und Wertung der Modellansätze  
D. Jacobi

**Nr. 34/1985**

- H. Gerdes           Berechnung dreidimensionaler Grundwasserströmung mit Mitteln der  
ebenen Potentialtheorie am Beispiel des Sickerstollens

**Nr. 35/1986**

- Diverse Autoren    Stofftransport im Wasser - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium  
1985: Zusammenstellung der Referate

**Nr. 36/1986**

- R. Schröder        Diskontinuierliche Abflussvorgänge in Freispiegelrinnen: Randwalzen  
R. Schröder        Die turbulente Strömung im freien Wechselsprung: Deckwalze  
C. Kraus            Walzenbildung im Kolk

**Nr. 37/1987**

- C. Heinzelmann    Transportbeginn auf geriffelter Sohle unter dem Einfluss einer stationär  
U. Höfer            gleichförmigen Strömung mit überlagerter Schwallwelle

**Nr. 38/1987**

- F. Zior            Regenwasserabfluss auf Fahrbahnoberflächen: experimentelle und  
theoretische Untersuchungen

**Nr. 39/1987**

- B. Söhngen        Das Formbeiwertkonzept zur Berechnung des Fließwiderstandes in Rohren  
und Gerinnen

**Nr. 40/1988**

Diverse Autoren Lösungsansätze zu aktuellen Problemen im Wasserbau - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1987: Zusammenstellung der Referate

**Nr. 41/1987**

G. J. Weiß Abfluss- und Wasserstandssteuerung in offenen Gerinnen mit Hilfe selbstregulierender Schwimmkörper

**Nr. 42/1989**

H. Zaiß Simulation ereignisspezifischer Einflüsse des Niederschlag-Abfluss-Prozesses von Hochwasserereignissen kleiner Einzugsgebiete mit Niederschlag-Abfluss-Modellen

**Nr. 43/1990**

Diverse Autoren Hydraulik und Hydrologie im Stadtbauwesen - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1989: Zusammenstellung der Referate

**Nr. 44/1990**

H. Wegner Steuerung für kleine Hochwasserschutzräume

**Nr. 45/1991**

U. Drechsel Repräsentanz und Übertragbarkeit von Niederschlagsersatz-belastungen zur Durchführung von Schmutzfrachtberechnungen

**Nr. 46/1991**

J. Lang Analyse und Simulation des Feuchtekontinuums auf Straßenoberflächen

**Nr. 47/1992**

G. J. Weiß Sohlenbeanspruchung und Sedimenttransport unter Einzelwellen

**Nr. 48/1992**

C. Heinzelmann Hydraulische Untersuchung über den Einfluss benthischer Diatomeenfilme auf Strömungswiderstand und Transportbeginn ebener Sandsohlen

**Nr. 49/1993**

J. Kühlborn Wachstum und Wanderung von Sedimentriffeln

**Nr. 50/1995**

M. Schuster Transportkritische Schubspannungen bei verschiedenen Sohlenzuständen, insbesondere unter Einzelwellenbelastung bei stationärer Grundströmung

**Nr. 51/1993**

(vergriffen)

Diverse Autoren Dezentraler Hochwasserrückhalt - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1992: Zusammenstellung der Referate

**Nr. 52/1994**

N. Engel Hydrologische Simulation der Abflusstransformation in Kanalisationsnetzen

**Nr. 53/1995**

Diverse Autoren Die modellgestützte Bewirtschaftung intensiv genutzter Einzugsgebiete - Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1994: Zusammenstellung der Referate

**Nr. 54/1996**

S. Wallisch

Ein mathematisches Modell zur Berechnung der hydromechanischen Beanspruchung von Riffelsohlen

**GESAMTVERZEICHNIS (ISSN 0340-4005)**  
der bisherigen Wasserbau-Mitteilungen der TH Darmstadt  
(teilweise Kurztitel)

*Bestellungen beim  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik  
Franziska-Braun-Straße 7, D-64287 Darmstadt  
Selbstkostenpreis EURO 20,- je Heft*

- Heft 1/März 66** (vergriffen)  
Bassler, F. Vorwort des Herausgebers  
Linder, R. Hochwasserentlastung von Staustufen durch Schiffsschleusen  
Bassler, F. Beginnt die Epoche der Gezeitenkraftwerke?  
Elshazli, S. Die Bedeutung der Wasserkraft für die ägyptische Wirtschaft
- Heft 2/Juli 67** (vergriffen)  
Uhlig, D. Probleme des landwirtschaftlichen Wasserbaus in Lybien  
Bassler, F. Eindrücke vom ICID-Kongreß in Indien  
Sauer, H.-D. Zentral messendes Wasserstands-Registriergerät für Modelle mit instationärer Strömung  
Bassler, F. Die Nutzung von Meerwasser in der Kattara-Senke/Ägypten
- Heft 3/Dez. 68** (vergriffen)  
Müller, J. Weltregister der Pumpspeicherkraftwerke  
Bassler, F. Wasserwirtschaftliche Sonderaufgaben in Entwicklungsländern  
Bayer, E. Die Versuchseinrichtungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Mäder, Ch. Die Exkursionen des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Bassler, F. Scheme for Qattara Depression/Egypt
- Heft 4/Aug. 69**  
Bayer, E. Gestaltung der Rampenbauwerke für Flussfähren
- Heft 5/Nov. 69**  
Sauer, H.-D. Industriewasserentnahme aus schwebstoffreichen Flüssen
- Heft 6/Okt. 70**  
Schröder, W. Ausbaugefällebemessung alluvialer Bachstrecken nach dem Sandtransportvermögen
- Heft 7/Febr. 71**  
Müller, J. Auswirkungen eines Unterbeckens für Pumpspeicherung auf die Wasserwirtschaft  
Bassler, F. Nuklearausbruch und Pumpspeicherung als Kostenfaktoren der Wasserkraftanlage in der Kattara-Senke/Ägypten
- Heft 8/Juli 71**  
Bassler, F. 10 Jahre Lehre und Forschung in Wasserbau und Wasserwirtschaft an der Technischen Hochschule Darmstadt  
Mäder, Ch. Modellversuche zur Umgestaltung des Mains bei Aschaffenburg  
Schmidtke, R. Projektstudie zur Regelung des Rio Mantaro in der Hochebene von Huancayo/Peru  
Schröder, W. Projektstudie zur Ufersicherung am Amazonas bei Iquitos/Peru  
Sulser, P. Gedanken zu den Exkursionen eines Wasserbaulehrstuhls



Fortsetzung Heft 8/Juli 71

- Täubert, U. Modellversuche für Hochwasserentlastungsanlage Staudamm Poza Honda/Ecuador  
Uhlig, D. Das Bewässerungsprojekt Al Hassa/Saudi Arabien  
Bassler, F. Studieneinführung Bauingenieurwesen, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft

**Heft 9/Nov. 71**

- Mäder, Ch. Strömungen durch Luftblasenschleier in stehenden und fließenden Gewässern

**Heft 10/Aug. 72**

- Schmidtke, R. Ein Kostenzurechnungsmodell für wasserwirtschaftliche Mehrzweckprojekte

**Heft 11/Dez. 73**

- (vergriffen)  
Sulser, P. Berührungslose Wasserstandsmessung mittels kontinuierlicher Kondensatorumladung  
Börner, R. Internationale Pumpspeicherbibliographie 1900 bis 1960  
Bassler, F. Solar Depression Power Plant of Qattara/Egypt  
Täubert, U. Der Abfluß in Schußbrinnenversuchen  
Bassler, F. Pumpspeicherkraftwerke an schiffbaren Wasserstraßen u. a.

**Heft 12/Apr. 74**

- Täubert, U. Wasserwirtschaftliche Systemanalyse des Wärmehaushalts von Flüssen

**Heft 13/Dez. 75**

- (vergriffen)  
Bassler, F. Neue Vorschläge für die Entwicklung der Kattara-Senke/Ägypten  
Bassler, F. New Proposals to Develop Qattara Depression/Egypt  
Börner, R. Moorentwässerung in Finnland  
Börner, R. Internationale Pumpspeicherbibliographie 1961 bis 1965  
Gräb, E. Konstruktion und Umbau einer Kipprinne  
Sulser, P. Die Wasserbau-Exkursionen des Instituts in den Jahren 1970 bis 1975, Forschungsvorhaben und Veröffentlichungen 1970 bis 1975

**Heft 14/März 77**

- Kriesel, E. Wasserwirtschaftliche Aspekte thermischer Energiequellen

**Heft 15/Mai 77**

- Börner, R. Einsatzmöglichkeiten der Mehrzweckpumpspeicherung in Entwicklungsländern

**Heft 16/Juli 77**

- (vergriffen)  
Franzius, V. Der Sickerwasserabfluß aus Mülldeponien - Ein mathematisches Modell

**Heft 17/ Aug. 77**

- (vergriffen)  
Tönsmann, F. Verringerung des Feststoffbetriebs in Entnahmebauwerken an Bächen

**Heft 18/Dez. 77**

- (vergriffen)  
Bassler, F.D. Die Energiequellen Fluss- und Meerwasser  
Bassler, F. Speisung der Schifffahrtskanäle mit Scheitelhaltung  
u.a.  
Bassler, F. 100 Jahre Bauingenieurwesen Arab Republic of Egypt : Qattara Depression  
Bassler, F. Tätigkeiten als Ordinarius für Wasserbau und Wasserwirtschaft

**Heft 19/Dez. 78**

- Sulser, P. Drucklufteinleitung in Flüsse zur Steuerung des Geschiebetransports

- Heft 20/Juni 79** (vergriffen)  
Friedrich Bassler 70 Jahre/Ansprache und Aufsätze zu seiner Emeritierung
- Heft 21/März 81**  
Döring, M. Einflüsse der Wassernutzung thermischer Kraftwerke auf Gewässer
- Heft 22/Aug. 83**  
Albert, W. Solarteich - Kollektor und Wärmespeicher  
Gonsowski, P. Bodenluftkompression bei Wasserinfiltration  
Gonsowski, P. Selbstdichtung von Fließgewässern  
Kaiser, W. Modellversuch HW-Entlastung Sösetalsperre  
Wieland, H.  
Krier, H. Erfahrungen bei Beregnungsanlagen im Hessischen Ried  
Krier, H. Erosionsbeginn bei kohäsiver Wasserlaufsohle  
Wieland, H. Modellversuch zur Hochwasser-Entlastung der Kulmke-Sperre/Harz
- Heft 23/Sep. 84** (vergriffen)  
Kaiser, W. Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit durchströmten Ufergehölzzonen
- Heft 24/Feb. 85** (vergriffen)  
Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1984 „Hochwasser am Oberrhein“
- Heft 25/Aug. 87**  
Wieland, H. Hydraulische Bemessung von Tosbecken für Überfallstrahlen und der Druckbelastung der Sohle
- Heft 26/Feb. 87** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1986 „Planungsansätze Ökologie - Wasserwirtschaft, so nicht! - wie dann?“
- Heft 27/Juli 87**  
Krier, H. Zum Langzeiterosionsverhalten kohäsiver Fließgewässersohlen
- Heft 28/Sep. 87**  
Gonsowski, P. Der Einfluß der Bodenluftkompression auf die vertikale Infiltration von Wasser in Sanden
- Heft 29/Dez. 89** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1988 `Fließgewässer – Stillgewässer
- Heft 30/Dez.89** (vergriffen)  
Albert, W. Die Gebietsverdunstung von Waldstandorten aus der Simulation von Grundwasserganglinien mit klimatischem Bodenwasserhaushaltsmodell
- Heft 31/Feb. 90**  
Weiß, J. Berücksichtigung der Hysterse der Wasserspannung bei der Berechnung der vertikalen Wasserbewegung in natürlichen Sandböden
- Heft 32/März 90** Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Josef Mock

- Heft 33/Aug. 90**  
Theune, Ch. Hydrological and Economical Aspects of Agronomically Productive Percolation Systems
- Heft 34/Dez. 90** (vergriffen)  
Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1990  
Umweltverträglichkeitsprüfung in der Wasserwirtschaft
- Heft 35/Nov. 91** (vergriffen)  
Nuding, A. Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit Ufergebüsch - Entwicklung eines Fließgesetzes für Fließgewässer mit und ohne Gehölzufer, unter besonderer Berücksichtigung von Ufergebüsch
- Heft 36/Dez. 91** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1991 „Boden- und Grundwasserschutz - anwendungsorientierte Forschung und Verfahren“
- Heft 37/März 92**  
Zimmermann, E. Phänomenologische Untersuchungen bei der Erosion einer kohäsiven Sohle
- Heft 38/Dez. 93** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1993 `Ökologisch orientierte Gewässersanierung und -pflege
- Heft 39/Dez. 93**  
Ruiz  
Rodriguez, E. Bodenluftströmung in teilgesättigten Böden
- Heft 40/Dez. 95** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1995 „Hochwassergefahren am Oberrhein“ und Fachseminar „Abflußabhängigkeit der morphologischen und biologischen Verhältnisse von Fließgewässern bei Niedrigwasser“
- Heft 41/Juli 99**  
von der Hude Die Kapillarsperre als Oberflächenabdichtungssystem von Deponien und Altlasten - Rinnenversuche und Bemessungsregeln

Die Reihe der „Wasserbau-Mitteilungen der TH Darmstadt“ wird zusammen mit den „Technischen Berichten über Ingenieurhydrologie und Hydraulik“ als **„Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt“** (ISSN 1430-3434) fortgesetzt. Die neue Nummerierung ergibt sich aus der Summe der Hefte beider Vorgängerreihen.

# Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt

## GESAMTVERZEICHNIS (ISSN 1430-3434)

*Selbstkostenpreis EURO 20,- je Heft. Bestellungen beim*

*Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung  
Franziska-Braun-Straße 7, D-64287 Darmstadt*

*oder*

*Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik  
Franziska-Braun-Straße 7, D-64287 Darmstadt*

- Heft 96/1996** (vergriffen)  
Träbing, K. Ökomorphologische Kenngrößen für die Strukturvielfalt von Fließgewässern
- Heft 97/1997**  
Jelinek, D. Die Kapillarsperre als Oberflächenbarriere für Deponien und Altlasten - Langzeitstudien und praktische Erfahrungen in Feldversuchen
- Heft 98/1997**  
Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1996 `Numerische Simulationen im Wasserbau
- Heft 99/1997**  
Berichte zur Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung
- Heft 100/1998**  
Kilian, T. Abflusscharakteristika und potentiell natürliche Gerinnegrundrissformen hessischer Fließgewässer
- Heft 101/1997**  
Döring, M. Die römische Wasserleitung von Pondel im Val d'Aosta/Italien. Bestandsaufnahme des Bauwerks aus dem Jahre 3 v. Chr.
- Heft 102/1998**  
Schmidt, T.R. Einfluss der Wandrauigkeitsstruktur auf die Geschwindigkeitsverteilung ausgebildeter, turbulenter Strömungen in Kreisrohren
- Heft 103/1998**  
Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1997 „Betrieb und Steuerung von Speichern und Stauhaltungen unter sich ändernden Randbedingungen“
- Heft 104/1998**  
Bettmann, T. Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung und deren Auswirkungen auf die Regenwasserbehandlung in urbanen Gewässereinzugsgebieten
- Heft 105/1998**  
Seid, A.H. Modelling the Influence of Shrinkage Cracks on Overland Flow
- Heft 106/1999** (Nachdruck)  
Zanke, U. Zur Physik von strömungsgetriebenem Sediment (Geschiebetrieb)
- Heft 107/1999**  
Obermann, I. Modellierung des Wasserhaushaltes von Deponien vorbehandelter Siedlungsabfälle

<b>Heft 108/1999</b>	Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 1998 Mischwasserbehandlung - Planung, Prüfung, Vollzug -
<b>Heft 109/2000</b> Kämpf, M.	Fließprozesse in Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten - Grundlagen zur hydraulischen Bemessung
<b>Heft 110/2000</b> Lempert, M.	Ein GIS gekoppeltes rasterbasiertes Modell zur Berechnung des Wasserhaushaltes kleiner Einzugsgebiete
<b>Heft 111/2000</b>	(vergriffen) Darmstädter Wasserbauliche Kolloquium 1999 „Fließ- und Ausbreitungsvorgänge in aquatischen Grenzräumen“
<b>Heft 112/2000</b>	100-Jahr-Feier des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft mit Festvortrag von Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. J. Plate
<b>Heft 113/2000</b> Mehler, R.	(vergriffen) Mischwasserbehandlung - Verfahren und Modellierung
<b>Heft 114/2000</b> Lenk, M.	(Nachdruck) Hydraulische Austauschvorgänge zwischen fließender Welle und Interstitial - Felduntersuchungen in einer Pool-Riffle-Sequenz an der oberen Lahn
<b>Heft 115/2000</b> Saenger, N.	(Nachdruck) Identifikation von Austauschprozessen zwischen Fließgewässer und hyporheischer Zone
<b>Heft 116/2000</b> Sieker, H.	Generelle Planung der Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten
<b>Heft 117/2001</b> Hailu, D.	Optimal planning and water management of irrigation systems
<b>Heft 118/2001</b> Lohr, H.	Simulation, Bewertung und Optimierung von Betriebsregeln für wasserwirtschaftliche Speichersysteme
<b>Heft 119/2001</b> Bente, St.	Eine Software-gestützte Methodik zur Voreinschätzung der wasserwirtschaftlichen Auswirkungen von Maßnahmen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung
<b>Heft 120/2001</b> Zanke, U.	Zum Einfluss der Turbulenz auf den Beginn der Sedimentbewegung
<b>Heft 121/2002</b> Hirschhäuser, T., Zanke, U.	Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken-Aussensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht
<b>Heft 122/2002</b>	Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 2000 Integrierte Gewässerbewirtschaftung in Verwaltung, Wissenschaft und Praxis
<b>Heft 123/2002</b> Kraus, T.	Rauheitsänderung durch Biofilmbewuchs in Druckrohrleitungen
<b>Heft 124/2002</b> Luckner, T.	Zum Bewegungsbeginn von Sedimenten

- Heft 125/2002**  
Holfelder, T. Temperaturbeeinflusste Transportprozesse in Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten
- Heft 126/2003**  
Mewis, P. Morphodynamisch-numerische Modellierung von Flusskurven
- Heft 127/2003**  
Wetzstein, A. Berechnung von Entlastungsabflüssen an gedrosselten Streichwehren auf der Basis von gemessenen Wasserständen
- Heft 128/2003**  
Hirschhäuser, T. Sedimentologische und biologische Aspekte der morphodynamischen Modellierung von Tidebecken
- Heft 129/2003** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 2003 „Hochwasserschutz“
- Heft 130/2003** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 2001  
Aktuelle Themen aus Hydromechanik, Wasserbau und Hydrologie
- Heft 131/2003**  
Witting, M. Simulation von Küstenlängs- und Küstenquertransport im 2DH-morphodynamischen Modell TIMOR3
- Heft 132/2003**  
Krebs, M. Untersuchung instationärer oszillierender Strömungen in buhnenverbauten Flussabschnitten und ihre Bedeutung für morphodynamische Berechnungen
- Heft 133/2004**  
Kudo, Eiji Sustainable Water Management in an Urbanizing River Basin in Japan, Based on Integrated Modeling Technique
- Heft 134/2005**  
Gebrewubet, Y. Numerical Modeling of Koka Reservoir Sedimentation
- Heft 135/2006**  
Schadrac, I. Nouvelle approche méthodologique pour l'analyse de la sécurité hydrologique des barrages en contexte sahélien soumis à une variabilité climatique
- Heft 136/2006**  
Link, O. Untersuchung der Kolkung an einem schlanken zylindrischen Pfeiler in sandigem Boden
- Heft 137/2006**  
Muschalla, D. Evolutionäre multikriterielle Optimierung komplexer wasserwirtschaftlicher Systeme
- Heft 138/2006**  
Klawitter, A. Ein Modellkonzept zur integrativen Betrachtung von Urban- und Ruralhydrologie auf Einzugsgebietsebene
- Heft 139/2006** Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium / DWA-Seminar 2005  
„Feststofftransportmodelle“
- Heft 140/2006**  
Wurpts, A. Numerische Simulation von Dichteeffekten am Beispiel der Umlagerung von Baggergut im Ästuarbereich

- Heft 141/2007**  
Seydell, I. Einlagerung von Feinstoffen in eine Flusssohle und Wasseraustausch zwischen Fluss und Interstitial – Naturuntersuchungen an einer Kiesquerbank der Lahn bei Marburg
- Heft 142/2007**  
Döring, M. Römische Häfen, Aquädukte und Zisternen in Campanien: Bestandsaufnahme der antiken Wasserbauten
- Heft 143/2007**  
Winterscheid, A. Szenariotechnik im Hochwasserrisikomanagement
- Heft 144/2008**  
Zanke, U.C.E. On Applicability of Morphodynamic Acceleration in Morphodynamic Simulations
- Heft 145/2009**  
Schröter, K.A. Contribution to the Uncertainty Analysis of Distributed Hydrological Models
- Heft 146/2009**  
Roland, A. Entwicklung von WWM II -Zur Seegangmodellierung auf unregelmäßigen Gitternetzen-
- Heft 147/2009**  
Wiesemann, J.-U. Zum Sedimenttransport auf quergeneigter Sohle
- Heft 148/2009**  
Zhou, X. Morphodynamic Response of Yangtze River Estuary to Sea Level Rise and Human Interferences
- Heft 149/2011**  
Diab, R. ExperimentallInvestigation on Scouring around Piers of different Shape and Alignment in Gravel
- Heft 150/2015**  
Nasner, H.  
Pieper, R.  
Torn, P. Sedimentation in Brackwasserhäfen
- Heft 151/2015**  
Kubetzek, T. Erosion an geotextilbewehrten Deichen bei langeinstauenden Hochwassern und Deichüberströmung
- Heft 152/2016**  
Schneider, S. Funktionsanalyse und Wirkungsoptimierung einer Wasserdruckmaschine
- Heft 153/2017**  
Dietsch, H. Entwicklung des Mekong in eine bedeutende internationale Schifffahrtsstraße
- Heft 154/2018**  
Dahlem, J.-G. Zur gekoppelten morphologischen Simulation der Dynamik sandiger Küsten unter Strömungs- und Seegangseinfluss
- Heft 155/2018**  
Berger, C. Rechenverluste und Auslegung (elektrifizierter) Schrägrechen anhand ethohydraulischer Studien

**Heft 156/2018**

Lehmann, B., Tagungsband zum 20. Treffen junger WissenschaftlerInnen  
Bensing, K., deutschsprachiger Wasserbauinstitute vom 29. bis 31. August 2018 in  
Borchardt, S., Darmstadt  
Kissel, G.,  
Lehmann, S.

**Heft 157/2020**

Böckmann, I. Entwicklung eines Verfahrenskataloges für statistisch abgesicherte  
ethohydraulische Forschungen



**ISSN-Nr.: 1430-3434**